

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних пристроїв та систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.316.174

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
Ю.С. Ямненко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 171 Електроніка, освітня програма Електронні прилади та пристрої
(код і назва спеціальності)

на тему: Імпульсна бездротова платформа для зарядки автомобільних акумуляторів

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕ-81 мн
(шифр групи)

Перов Олександр Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник:

Професор кафедри ЕПС, д.т.н. Кузьмичев Анатолій Іванович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент:

Доцент кафедри мікроелектроніки, к.т.н. Татарчук Дмитро Дмитрович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет: Електроніки _____
(повна назва)

Кафедра: Електроніки пристроїв та систем _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність: 171 Електроніка, освітня програма Електронні прилади та пристрої
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Ю.С. Ямненко
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Перов Олександр Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Імпульсна бездротова платформа для зарядки автомобільних акумуляторів _____

науковий керівник дисертації: професор кафедри ЕПС, д.т.н. Кузьмичев
Анатолій Іванович _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «17» березня 2020 р. № 887

2. Строк подання студентом дисертації: 8 травня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження: Імпульсна бездротова платформа _____

4. Предмет дослідження: (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Електромагнітна індукція, метод математичного моделювання, провідника.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд розподілу щільності струму і енергії в поперечному перерізі провідника, розподіл потужності на приймальній котушці в залежності від частоти для визначення максимуму потужності для розробки імпульсної бездротової платформи

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 48 ілюстрацій креслення конструкції та електричних схем зі специфікаціями

7. Орієнтовний перелік публікацій: 2 публікації

8. Дата видачі завдання: 17.02.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Узгодження теми Магістерської дисертації	17.02.2019	
2.	Пошук науково-технічної літератури	30.10.2019	
3.	Аналіз зібраної науково-технічної літератури	17.01.2020	
4.	Порівняння та вибір оптимального методу передачі енергії	19.02.2020	
5.	Вибір програмного забезпечення, для моделювання магнітних полів	10.03.2020	
6.	Вибір програмного забезпечення, для моделювання розподілу потужності на приймальні котушки в залежності від частоти	16.03.2020	
7.	Проведення моделювання магнітних полів	23.03.2020	
8.	Проведення моделювання розподілу потужності на приймальні котушки в залежності від частоти	06.04.2020	
9.	Аналіз отриманих результатів	20.04.2020	
10.	Висновки	27.04.2020	

Студент

(підпис)

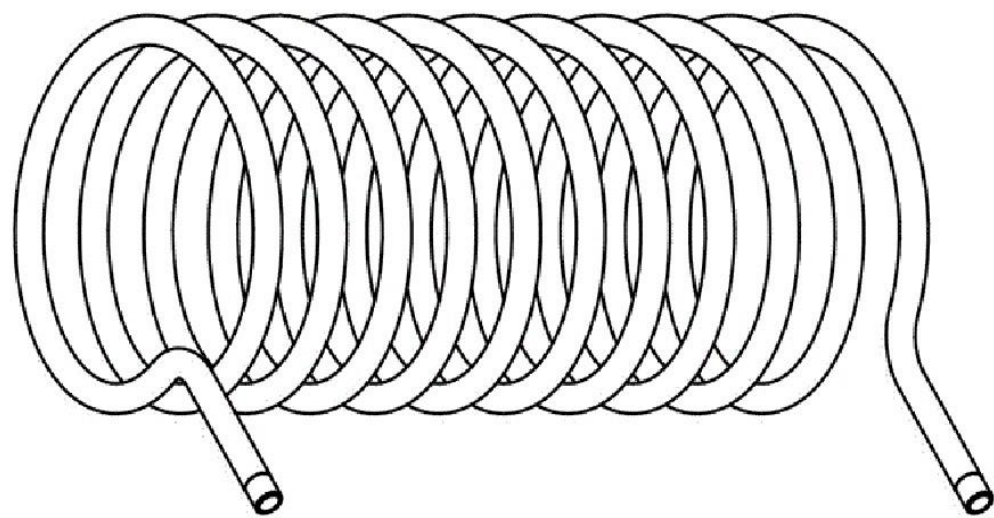
Перов О. Г.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

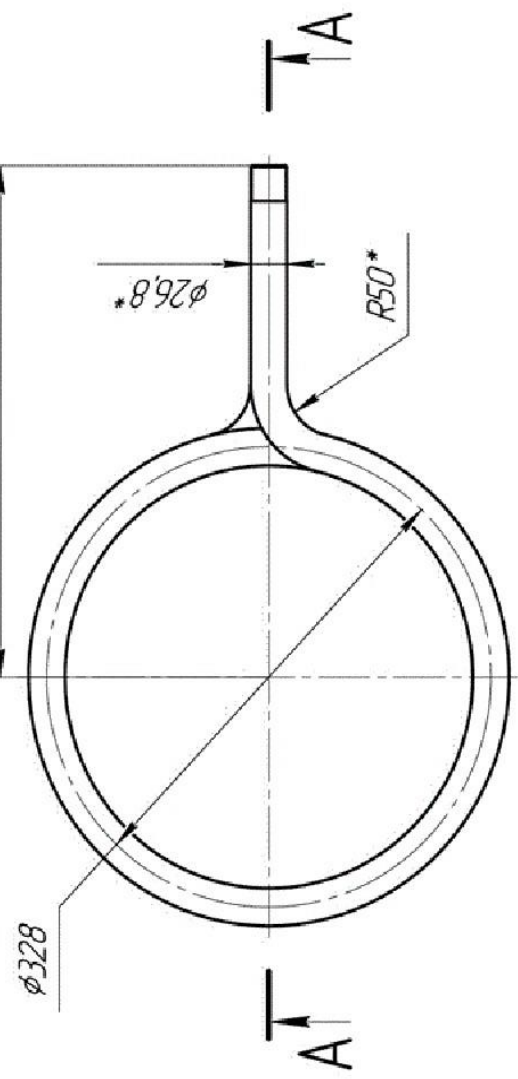
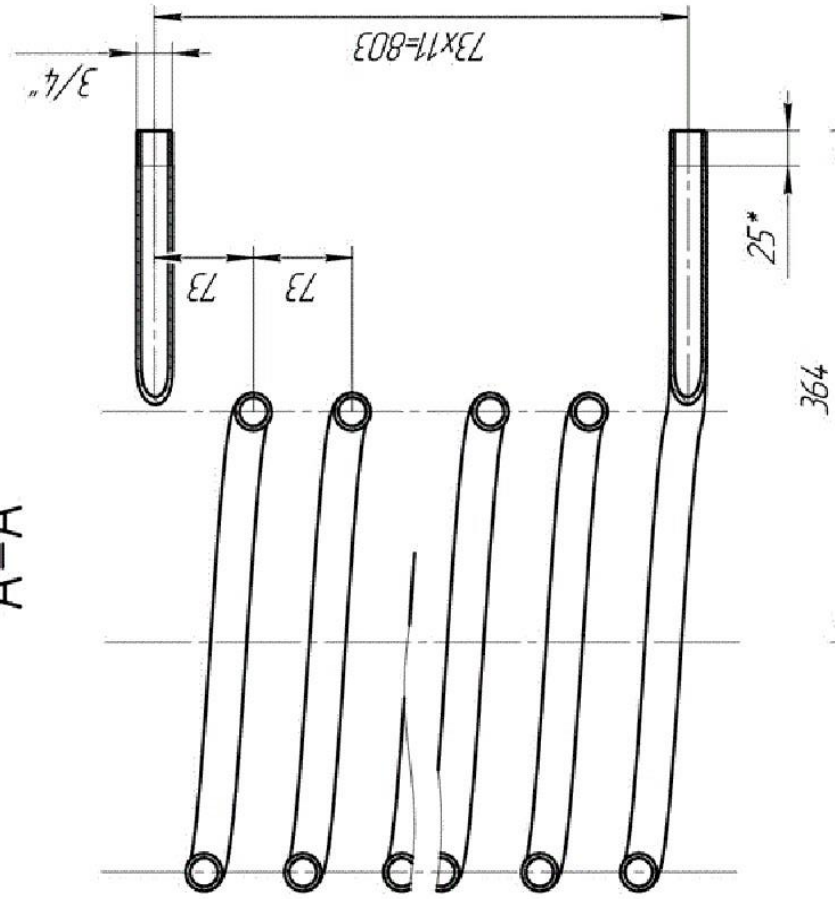
(підпис)

Кузьмичєв А.І
(ініціали, прізвище)

[illegible]



A-A



МРН 171.081.002 СК

Изм/Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист	Масса	Максимум
Разраб	Перое О.Г.					14
Лист						

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської дисертації

**на тему: «Імпульсна бездротова платформа для зарядки автомобільних
акумуляторів»**

РЕФЕРАТ

Імпульсна бездротова платформа для зарядки автомобільних акумуляторів

Магістерська дисертація освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр наукового спрямування» спеціальності 171- Електроніка, освітня програма – Електронні прилади та пристрої. **Перов Олександр Геннадійович**. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні пристрої та системи». Група ДЕ-81 мн. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 79 с., іл. 48.

Ключові слова: Бездротова платформа, електромагнітна індукція, COMSOL Multiphysics, розподіл вектора магнітного потенціалу, скін-ефект, розподіл щільності струму, розподіл щільності енергії, нормальна складова.

Короткий зміст роботи: В дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по бездротових платформах та методів передачі енергії. Показано перспективи використання методу електромагнітної індукції та його перевагу перед над іншими методами. Приведено результати дослідження фізико-математичної моделі імпульсної бездротової платформи та результати розрахунку параметрів та характеристики бездротової платформи, такі як енергія та потужність що надходить на приймальну котушку,

АНОТАЦІЯ

Дисертація присвячена дослідженню та моделюванню імпульсної бездротової платформи, для зарядки автомобільних акумуляторів, яка використовує метод електромагнітної індукції.

В даній дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по бездротових платформах та методах передачі енергії. Буде обгрунтовано актуальність використання таких бездротових платформ та перевагу методу електромагнітної індукції. Також пропонується проведення моделювання тестової моделі такої платформи та дослідження її характеристик з метою визначення шляхів для удосконалення існуючих систем.

SUMMARY

The dissertation is devoted to research and modeling of a pulsed wireless platform for charging car batteries, which uses the method of electromagnetic induction.

This dissertation presents a review of scientific and technical literature on wireless platforms and methods of energy transmission. The relevance of the use of such wireless platforms and the advantage of the electromagnetic induction method will be substantiated. It is also proposed to model a test model of such a platform and study its characteristics in order to identify ways to improve existing systems.

Імпульсна бездротова платформа для зарядки автомобільних акумуляторів

ЗМІСТ

ВСТУП	13
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ПЛАТФОРМІ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	16
1.1. Бездротова передача сонячної енергії супутником на Землю, за рахунок НВЧ випромінювання.....	16
1.2. Вплив атмосфери або вікно прозорості іоносфери	17
1.3. Генерування випромінювання високої потужності	18
1.4. Передавальні і приймальні антени.....	18
1.5. Електромагнітні перешкоди щодо існуючих бездротових систем.....	19
1.6. Біологічний вплив на тканини людей і тварин	20
1.7. Бездротова передача енергії, за допомогою лазера і фотоелектричного перетворювача	21
1.8. Експеримент з передачі енергії за допомогою Nd:YAG лазера і PowerSphere	23
1.9. Результати експерименту з передачі енергії за допомогою Nd:YAG лазера і PowerSphere	25
1.10. Бездротова передача енергії за допомогою LC компенсації	27
1.11. Недоліки передачі без резонансу	27
1.12. Принципи LC компенсації.....	28
1.13. Резонансна ефективність і загальна ефективність.....	29
Висновки	30
2. МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ	32
2.1. Принцип дії бездротової передачі електроенергії на основі явища електромагнітної індукції	32
2.2. Індуктивно пов'язані елементи ланцюга.....	33
2.3. Резонанс в індуктивно зв'язаних контурах	36
2.4. Індуктивний метод в якості безконтактної передачі енергії при зарядці електромобіля	41
2.5. Векторна ілюстрація збудження електромагнітного поля.....	45
Висновки	49

					МРН.171.081.002 ТК					
					Платформа для бездротової передачі енергії			Літ.	Арк.	Аркушів
Зм	Арк	№ докум.	Підпи	Дат						
Розроб.	Перов О.Г.									
Перевір	Кузьмичев А.І.									
Реценз.	Татарчук Д.Д.							«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ		
Н.Контр	Чадюк В.О.									
Затверд										

3. ПРИНЦИП ДІЇ ІМПУЛСНОЇ БЕЗДРОТОВОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ АВТОМОБІЛЬНИХ АКУМУЛЯТОРІВ.....	50
3.1. Бездротовий зарядний пристрій за стандартом WPC	50
3.2. Схема бездротової платформи за стандартом WPC	52
3.3. Особливості конструкції бездротового зарядного пристрою.....	53
3.4. Застосування платформи за стандартом WPC в якості безконтактної передачі енергії електромобілям на проїжджих частинах	55
3.5. Безпека і вплив на здоров'я людини застосування безконтактних способів передачі енергії.....	61
Висновки	64
4. Моделювання магнітних полів котушок та енергії між ними.....	65
4.1. Вибір програмного забезпечення	65
4.2. Створення вихідної області та геометрії об'єктів	66
4.3. Опис математичної моделі об'єкта дослідження.....	68
4.4. Розрахунок індуктивності і активного опору котушки	75
4.5. Розрахунок власної ємності котушки.....	77
4.6. Моделювання електромагнітного поля для котушок різної конфігурації.....	77
4.7. Розрахунок потужності в приймальній котушці спіралевидної форми	81
Висновки	84
ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	86

					МРН.171.081.002 ТК					
Зм	Арк	№ докум.	Підпи	Дат	Платформа для бездротової передачі енергії			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Перов О.Г.									
Перевір	Кузьмичев А.І.									
Реценз.	Татарчук Д.Д.							«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ		
Н.Контр	Чадюк В.О.									
Затверд										

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ – надвисокочастотне

ККД – коефіцієнт корисної дії

ДНК – дезоксирибонуклеїнова кислота

БЖ – блок живлення

ІЧ – інфрачервоне

ЕРС – електрорушійна сила

ЕМП – електромагнітне поле

ВЧ – високочастотне

НЧ – низкочастотное

МСЕ – метод скінченних елементів

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я

SMD – surface mount technology

SAR – specific absorption rate

ICNIRP – international commission on non-ionizing radiation protection

IEEE – institute of electrical and electronics engineers

FCE – federal communication commission

SCiB – super charge ion battery

DWPT – dynamic wireless power transfer

WPC – wireless power consortium

ВСТУП

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день поширення електромобілів стає все поширенішим і глобальним.

Наприклад, така країна як Норвегія, у 2025 році планує повністю перейти на використання електромобілів, а за нею також, схожий план мають такі країни, як Данія, Ізраїль та Нідерланди до 2030 року, а Франція та Велика Британія до 2040 року.

В свою чергу, Німеччина - котра славиться виробництвом своїх автомобілів, вже у 2030 році планує заборонити продажу автомобілів тільки з двигунами внутрішнього згоряння.

Судячи з цих фактів, вже через кілька років гостро постане питання ефективності уніфікованих платформ для зарядки електромобільних акумуляторів які вмонтовані в корпус автомобілів, тож дана магістерська дисертація, присвячена дослідженню процесу бездротової передачі електроенергії з метою модернізації існуючих систем для зарядки електромобілів.

Завдяки впровадженню технології зарядки без проводів, більше не потрібно буде чекати годинами на зарядних станціях, доки зарядиться акумуляторна батарея електромобіля, адже тепер можна заряджати свій автомобіль просто запаркувавши його на місці стоянки біля офісу чи магазину, або стоянки в гаражі, чи навіть під час руху. На сьогоднішній день люди дуже добре знайомі з бездротовою передачею даних, аудіо та відеосигналів, тож чому не можна передати без дротів і електроенергію.

Великий вчений Нікола Тесла зробив багато безмежно дивовижних відкриттів і винаходів, і бездротова передача електроенергії є одним із них. Він розпочав експерименти з бездротової передачі електроенергії в 1891 році і розробив котушку Tesla. У 1901 році, маючи за мету створення нової бездротової системи передачі електроенергії, Нікола Тесла приступив до розробки вежі

Варденкліффа для великої високовольтної бездротової станції передачі енергії. На жаль, після відмови Джона П.Моргана фінансувати проект, роботи були припинені, а збудовану вежу американський уряд підірвав 4 липня 1917 року. Таким чином, більше ніж сто років тому, людство вже дізналося про можливість бездротової передачі електроенергії, та не змогло застосувати цю можливість на практиці. Але науково-технічний прогрес не стоїть на місці, і на сьогодні вже дуже актуально постало питання розробки технологій для бездротової передачі електроенергії, в тому числі, і для розробки імпульсної бездротової платформи для зарядки автомобільних акумуляторів.

Мета та завдання дослідження. Метою даної дипломної роботи є моделювання розподілу потужності на приймальній котушці в залежності від частоти, для визначення максимуму потужності бездротової платформи, що дозволяє заряджати основні типи акумуляторних батарей електромобілів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом роботи виступає платформа для бездротової передачі енергії.

Предметом є процес моделювання передачі енергії на приймальну котушку.

Методи наукового дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися як загальнонаукові, так і спеціальні методи наукового пізнання. Системний аналіз, дедуктивний та індуктивний методи використовувалися при визначенні суті понять «бездротова платформа». Інформаційну базу дослідження складають чинні вітчизняні та зарубіжні законодавчі та нормативно-правові акти, нормативно-методична документація.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи можуть бути використані при розробці, модернізації та налаштуванні платформи для бездротової передачі енергії.

Достовірність дослідження. При реалізації проекту було вивчено значне число літературних джерел, посібників і статей, що охоплюють обрану тематику. Повний їх список представлений в кінці проекту.

Структура дипломної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, що включають в себе 30 підрозділів, висновків та списку літератури з 22 найменувань, загальний обсяг роботи 92 сторінки.

1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ПЛАТФОРМИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

1.1. Бездротова передача сонячної енергії супутником на Землю, за рахунок НВЧ випромінювання

Ранні дослідження можливості створення системи бездротової передачі енергії на великі відстані дали можливість запропонувати результати цих досліджень для розробки системи штучних потужних сонячних супутників і їх використання для бездротової передачі високо потужної енергії сонця на Землю, як показано на рис. 1.1.

Було запропоновано 2 види такої передачі:

- Передача за рахунок поширення надвисокочастотних хвиль.
- Передача за рахунок поширення оптичного або лазерного випромінювання.

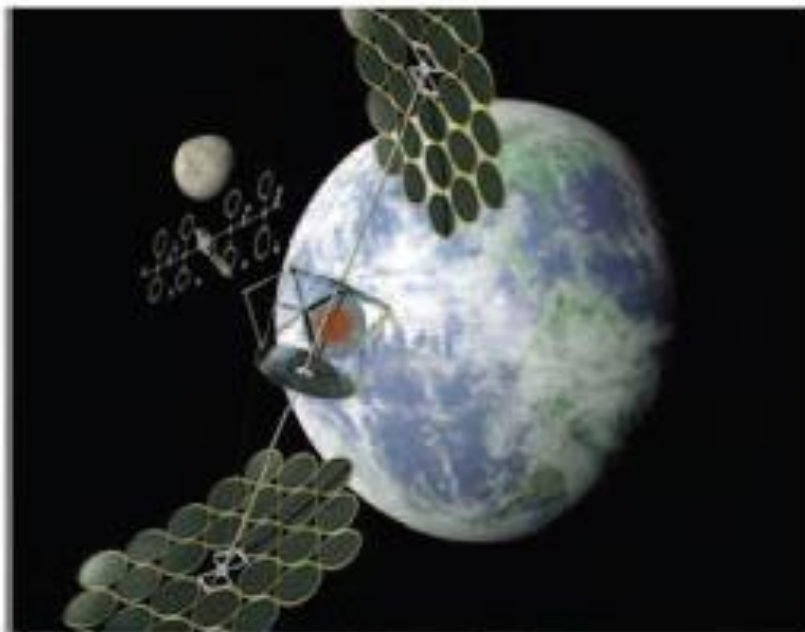


Рис. 1.1 Ілюстрація космічного супутника електростанції сонячної енергії

Через великі втрати енергії під час туманів або дощів, від механізму передачі енергії за рахунок лазерного випромінювання відмовилися, і за основу було взято до розгляду спосіб бездротової передачі енергії на Землю за рахунок НВЧ випромінювання.

Для забезпечення функціонування даного проекту передачі сонячної енергії супутниками, необхідно, щоб система мала наступні характеристики:

- Низьке розташування супутників.
- Робота за будь-яких погодних умовах.
- Складна антена на супутнику.
- Виробництво енергії високої потужності.
- Система пульсової хвилі, для використання у військових цілях і система постійних пульсових хвиль для вироблення природозберігаючої відновлюваної енергії.

1.2. Вплив атмосфери або вікно прозорості іоносфери

Для того, щоб побудувати дану систему передачі енергії, необхідно визначити робочу частоту мікрохвиль, які проходять через атмосферу. В експериментах використовували дві частоти - 2.45 ГГц і 5.8 ГГц. Однак, в подальшому, необхідне більш детальне дослідження для того, щоб визначити спектр частот або вікно прозорості іоносфери, за рахунок яких мікрохвилі можуть проходити через атмосферу, і при цьому іоносфера не буде іонізуватися і формувати загороджувальний шар. Ефекти, які виникають через шари опадів у тропосфері, також важливі і повинні бути взяті до уваги при розробці такої системи. У 1978 році модель електричного нагріву Перкінса і Роубела викликала занепокоєння з приводу її можливого негативного впливу на іоносферу. І хоча дослідження було проведено, та отримано чимало корисних результатів, все таки є

потреба у проведенні більшої кількості досліджень на цю тему, з врахуванням постійних змін в атмосфері Землі.

1.3. Генерування випромінювання високої потужності

Вироблення енергії високої потужності є однією з головних відправних точок для дослідження і розробки, які повинні бути проведені. Зазвичай для проведення такого дослідження використовуються два види випромінювача високої потужності: перший - електронний НВЧ-прилад, другий - напівпровідниковий підсилювач. Мікрохвильовий генератор/підсилювач має різні електричні заряди. Електронний НВЧ-прилад може виробляти і посилювати мікрохвилі високої потужності (понад кВт), при заданій високій напрузі (понад кВт). Напівпровідниковий підсилювач може забезпечувати мікрохвилі малої потужності (менше 100 Вт) при заданій низькій напрузі (нижче 15 В), але це економічно неефективно. Наразі йде чимало обговорень щодо ефективності генератора/підсилювача, та в загальному висновку електронний НВЧ-прилад має більшу ефективність (вище 70%), а напівпровідниковий підсилювач меншу ефективність (менше 50%).[1]

1.4. Передавальні і приймальні антени

Передавальна антена і антенна решітка, необхідні для передачі енергії високої потужності на великі відстані, повинні бути з великим посиленням, і вельми низькими бічними і задніми пелюстками діаграми спрямованості. Також, бажано, щоб на пелюстках антени були скануючі реєстри. Кілька різних антен можуть бути встановлені для системи бездротової передачі енергії, наприклад, антена типу хвильовий канал», рупорна антена, параболічна дзеркальна антена, мікро-полоскова антена, фазована антенна решітка або декілька інших видів

антен. Для того, щоб пелюстки були вузькими, а сама антена була з високим посиленням, для системи бездротової передачі енергії, зазвичай вибирають велику параболічну антену або великий ряд щілинних антен. Для того щоб антенні решітки були легкими, складними і рівнокутними - добре підходять мікро-полоскові антени, хоча посилення вони дають не дуже високе.

Приймальна антена-випрямляч монтується з випрямляючими частинами, для отримання і виправлення мікрохвиль з передавальної частини всієї системи бездротової передачі енергії. Тому, антена-випрямляч або антена з вбудованими випрямлячами, є важливою частиною системи, адже задіяння антен-випрямлячів значно впливає на ККД перетворення інвертора і на загальний ККД системи бездротової передачі. Краща нелінійна приймальна антенна решітка і її форма повинні бути оптимальними для досягнення найкращого прийому мікрохвильової енергії.[1-2]

1.5. Електромагнітні перешкоди щодо існуючих бездротових систем

Згідно висновків спеціальної літератури, існуючі системи бездротової передачі енергії на великі відстані працюють на двох надвисоких частотах, близько 2,45 ГГц або 5,82 ГГц. Ці дві робочі частоти вже були виділені в регламенті радіозв'язку в Міжнародному союзі радіозв'язку для багатьох служб. У той же час, вони також призначаються для медичного і промислового застосування, наприклад, частота 2,45 ГГц використовується для локальних мереж і мікрохвильовок, а 5,8 ГГц часто використовується в різних областях, таких наприклад, як радіолокаційна служба і короткострокові спеціально виділені лінії зв'язку. З цієї причини, ефект електромагнітної сумісності та перешкод на цих двох частотах стали актуальною темою для обговорення, і знову ж таки, потрібно більше досліджень для того, щоб отримати фізичне розуміння проблем

електромагнітної сполучуваності та електромагнітних завад та мінімізувати ці перешкоди.[2]

1.6. Біологічний вплив на тканини людей і тварин

Загальний публічний інтерес до передачі мікрохвиль високої потужності з космосу на Землю обумовлений ще й небезпекою, яку вони представляють для всіх живих організмів, в тому числі для тканин людини і тварин. Починаючи з 1950 року було опубліковано велику кількість документів на тему біологічного впливу мікрохвиль на біосферу. Наукові дослідження були спрямовані на два аспекти: перший – нагрівання тіла людини, яке піддалося впливу НВЧ-випромінювання; другий - біологічний вплив на руйнування ДНК. Відносна межа опромінення, зафіксована в стандартах Інституту інженерів електротехніки та електроніки при частоті 2,45 ГГц або 5,82 ГГц, становить 81,6 Вт/м² і 100 Вт/м² в середньому за 6 хвилин і 16,3 або 38,7 Вт/м² в середньому за 30 хвилин. Цей рівень є набагато нижчим в порівнянні із середнім рівнем сонячної радіації, який в свою чергу становить 1000 Вт/м². За цими підрахунками і викладками можна зробити висновок, що мікрохвильове опромінення людського тіла і тварин за своїм впливом на живі організми, є схожим на вплив місячного світла. Наразі існує немало конструктивних заяв з приводу малоактивних нетеплових впливів на живі організми, адже вони здаються низько-температурними і безпечними в порівнянні з отриманими і змодельованими результатами. Так само існує думка, що довгостроковий вплив хвиль низької активності може бути небезпечним та викликати онкозахворювання. Однак, через велику кількість неясностей, дослідження такого роду все ще тривають і потребують продовження експериментів для визначення їх біологічного впливу та комплексного аналізу наслідків такого впливу.

Проводилися, також, експериментальні тести, в яких вивчали вплив мікрохвильової радіації на птахів для того, щоб перевірити так званий «ефект згорілої птиці» на частоті 2,45 ГГц. У дослідженнях зафіксовано слабкий тепловий вплив, та зроблено висновок, що теплового впливу потрібно уникати. Великі птахи зазвичай відчувають більше теплового стресу, ніж птахи меншого розміру. Загальним висновком про біологічну дію нетеплового впливу на тканини тварин і людей є те, що мікрохвильове випромінювання зазвичай є нешкідливим, за винятком випадків сильного випромінювання, яке набагато перевищує існуючі допустимі межі опромінення.

1.7. Бездротова передача енергії, за допомогою лазера і фотоелектричного перетворювача

PowerSphere (PS) - це сучасна високоефективна фотоелектрична перетворювальна камера (PVCC), яка знаходиться на стадії розробки і буде призначена для бездротової передачі енергії або лазерного випромінювача потужності (Laser Power Beaming). Цільовий діапазон її потужності становить від 1 кВт до 100 кВт. Як приймач в ній використовується модифікований сонячний PVCC, оснащений передовими кремнієвими клітинами.

PowerSphere є різновидом фотоелектричної перетворювальної камери для сонячних систем, яка була розроблена в рамках декількох DOE/NREL субконтрактів і грантів Каліфорнійської енергетичної комісії. Відповідні дослідження показали, що з допомогою системи з чотирьох різних клітинних матеріалів, з співпадаючими забороненими зонами та пов'язаних фільтрів, можна домогтися ефективності перетворення ~ 50%.

Дослідження прогнозують, що сфера, налаштована на одну частоту Nd:YAG лазера і оснащена точно налаштованими (точність ширини забороненої зони) III-V

фотоелементами, сягатиме ККД 60 - 65% при рівні потоку світла всередині порожнини 50 Вт/см².

PowerSphere оснащена кремнієвими клітинами SunPower (концентратори HEDA312), які мають підвищену квантову ефективність в ближньому ІЧ-діапазоні. Клітини кремнію займають 24% площі порожнини стіни сфери. Інша частина покривається матеріалом Spectralon, який має найвищий коефіцієнт дифузного відбиття, і золотим покриттям.

Проект в цілому орієнтований на розбіжність близьку до дифракційної Nd:YAG лазерів, що працюють на 1,064 мкм. PowerSphere легка, компактна, мобільна і надійна. Таким чином, вона забезпечує високу питому потужність (> 1500 Вт/кг) і питомий об'єм (Вт/м³) в космосі і в атмосфері. Ці передові особливості PS і Nd:YAG систем, засновані на останніх досягненнях включаючи:

- Точність «забороненої зони» в ближньому інфрачервоному діапазоні.
- Постійний прогрес у підвищенні якості пучка і вихідної потужності Nd: YAG лазерів.

Nd:YAG лазери, в поєднанні з адаптивною оптикою і точно налаштованої PS, забезпечать можливість свого застосування в різних сферах. Наземні застосування включають дистанційне живлення роботизованих пристроїв для експлуатації в небезпечних умовах, наприклад: поле бою, вогонь, зберігання радіоактивних матеріалів і т.д. Для використання в космосі NASA і NGST вивчають її характеристики для дистанційного живлення автомобіля Mars Rover. Застосування в межах атмосфери Землі, включає в себе забезпечення живленням на великій висоті для дирижаблів та підзарядка елементів живлення безпілотних літальних апаратів, для забезпечення їх безперервного польоту.

1.8. Експеримент з передачі енергії за допомогою Nd:YAG лазера і PowerSphere

Як показано на рис. 1.2, промінь потужністю 200 Вт Nd:YAG лазера спрямований на вхідний отвір світло відбиваючого параболічного концентратора, без будь-яких додаткових оптичних компонентів для того, щоб контролювати форму променя. Параболічний концентратор вносить світло у внутрішню частину сфери через маленький отвір ($D = 1,48\text{см}$) в стінці сфери. Діаметр променя на відстані 3м від лазера становить приблизно 2.5 см. На рис. 1.3 показано пляму лазерного променя на мішені з молібдену, зроблену цифровою ІЧ-камерою.

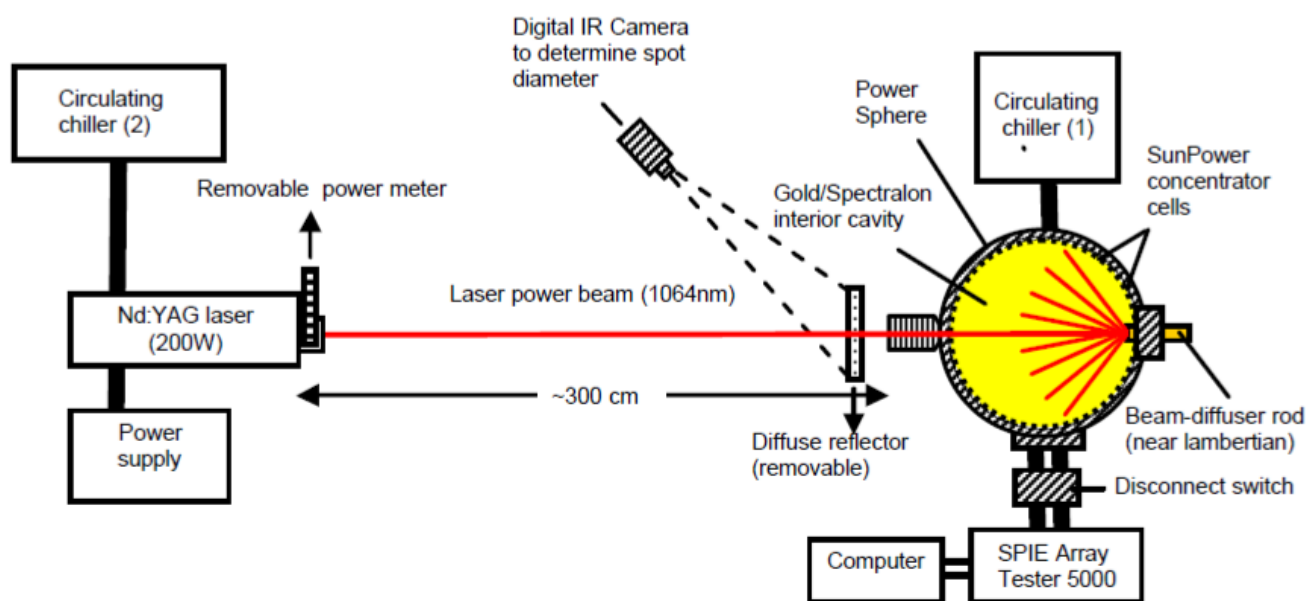


Рис. 1.2 Схема випробувальної установки Laser Power Beaming



Рис. 1.3 Пляма лазерного променя на молібденовій мішені

При такому діаметрі, велика частина променя входить в порожнину сфери без відображень і падає на стрижень променя-дифузора. Відбите світло висвітлює порожнину PowerSphere рівномірно, про що свідчить плоска вершина струму на рис. 1.4.

Задіяний в експерименті Nd:YAG лазер працює в безперервному режимі з простим резонатором. Генератор придбано у Lee Laser в Орландо, Флорида, решту лазеру зібрано на місці. Максимальна вихідна потужність, яку видає такий лазер, становить 200 Вт.

Внутрішня стінка порожнини покрита 22 міні модулями, кожен з яких складається з 12 HEDA312 клітин виробництва SunPower. Ці клітини з великою концентрацією кремнію пристосовані для спектру сонячних випромінювань. Через дуже низьку щільність потоку всередині порожнини сфери ($0,075 \text{ Вт} / \text{см}^2$ при 160 Вт.), охолоджувач 1, показаний на рис. 1.2, не використовується.

Експеримент проводився з SPI-ARRAY TESTER 5000. Цей пристрій являє собою портативну систему, здатну вимірювати і зберігати показники струму і

напруги великої фотоелектричної системи. Вимірювач параметрів досліджує модулі або елементи при вихідній потужності від 10 Вт до 50 кВт. На рис. 1.2 показано, як підключено вимірювач із супровідним комп'ютером.

Експеримент був проведений з двома напівсферами (в кожній по 11 міні-модулів), які приєднані або паралельно, або послідовно. Обидві напівсфери дали схожі результати. Температура роботи клітин, потужність променя і інтенсивність світла всередині сфери були обчислені окремо, незалежно від вимірювача.

1.9. Результати експерименту з передачі енергії за допомогою Nd:YAG лазера і PowerSphere

З точки зору фотоелектричної енергетичної установки, PowerSphere є «антенною», яка складається з великої кількості міні-модулів. Тому ефективність, яка вимірювалась, повинна розглядатися як ефективність «антени», а не ефективність «модулів». На рис. 1.4 представлені параметри випробувань PowerSphere, отримані в послідовної конфігурації.

Табл. 1.1 - Система ключових параметрів і ефективність системи

Параметр	Значення
Потужність променя	160 Вт
Діаметр променя	2,5 см
Температура клітини	410 °C
Оптичні втрати	10 %
V_{oc}	15,8 В

Isc	1,5 A
P _{макс}	18,96 Вт
Виміряна ефективність	11,9 %
Ефект. з поправкою на Оптичні втрати і температуру 250°C	14,2 %

Виходячи з усіх цих досліджень, логічним буде висновок, що бездротові системи зарядки можна використовувати і для зарядки акумуляторів електромобілів. В цьому випадку необхідно буде забезпечити ефективну передачу потужності понад 3 кВт на зовсім невелику відстань, приблизно 10-20 см. Для виконання зарядки індукованим способом досить встановити електромобіль над передавачем, і процес зарядки почнеться автоматично. Очікується, що використання бездротової зарядки буде сприяти зростанню популярності таких транспортних засобів серед споживачів, в тому числі, і за рахунок спрощення процедури його «заправки».

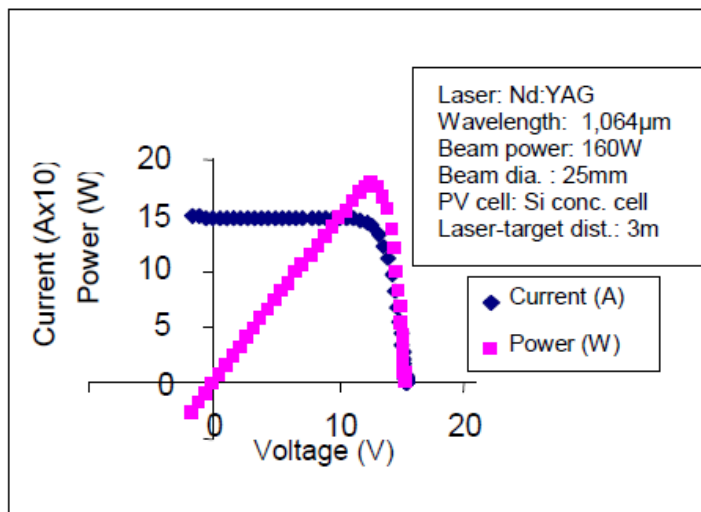


Рис. 1.4 Показання PowerSphere при послідовній конфігурації, отримані з потужністю променя 160 Вт Nd:YAG лазера

1.10. Бездротова передача енергії за допомогою LC компенсації

Практичний інтерес до дослідження технологій бездротової передачі енергії для зарядки елементів живлення збільшився після того, як Массачусетський технологічний інститут в 2007 році представив магнітно-резонансну технологію. Зазвичай електромагнітні індукційні системи вимагають високого коефіцієнту зв'язку, що в свою чергу, перешкоджає передачі електроенергії на далекі відстані. Але, в той же час, цей метод може бути дуже ефективним для передачі електроенергії на невеликі відстані. Коефіцієнт зв'язку котушки зменшується зі збільшенням відстані передачі. Проте, при використанні відповідного конденсатора, можна сформувати явище резонансу. В результаті, використавши явище резонансу, здатність передачі потужності можна буде збільшити, навіть якщо коефіцієнт зв'язку буде дуже низьким.[2-3]

1.11. Недоліки передачі без резонансу

Рис. 1.5 показує зміну вихідної потужності, через зміну коефіцієнту зчеплення і сили опору. Система передачі за рахунок електромагнітної індукції використовує силу руху струму, яка виробляється за рахунок зміни потоку магнітної індукції, який проходить через іншу котушку. Так як з'єднання потоку посилюється за рахунок того, що котушки розташовані дуже близько відносно одна одної, то коефіцієнт зв'язку теж зростає. Але у випадку збільшення відстані між котушками з'єднання потоку зменшується, в результаті чого збільшується індуктивність розсіяння та падає коефіцієнт зв'язку. Тобто, густина потоку отримуваної енергії значно скорочується, якщо коефіцієнт зв'язку низький, а отже, метод електромагнітної індукції може передавати достатню кількість енергії тільки на невеликі відстані, що підтверджується графіком коефіцієнтів зв'язку на рис. 1.5. Якщо необхідно передати досить енергії навіть за умови маленького

коефіцієнта зв'язку, то необхідно застосувати іншу технологію, щоб компенсувати недолік індукції.[3]

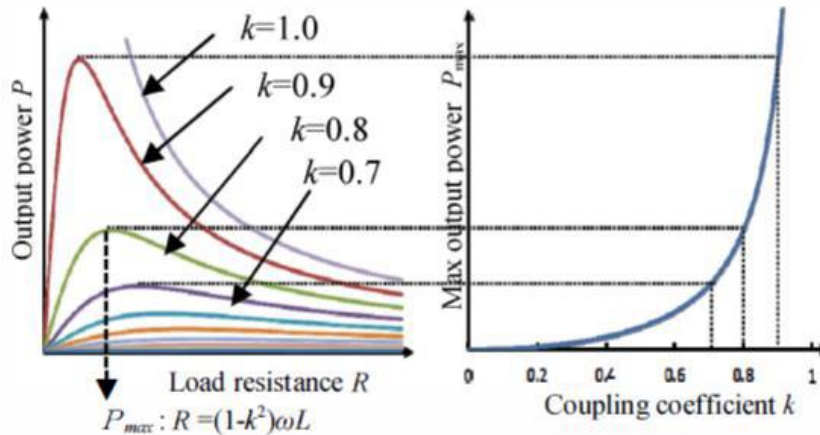


Рис. 1.5 Залежність вихідної потужності від коефіцієнта зв'язку

1.12. Принципи LC компенсації

Коли індуктивність і ємність з'єднані послідовно, як показано на рис. 1.6(а), відбувається послідовний резонанс, і різниця напруг по схемі LC вважається рівною нулю, як показано на рис. 1.6(б).

Проте, внутрішній опір існує в кожному елементі схеми, що призводить до втрати потужності. Сформовані напруги в L і C елементах не повинні перевищувати їх допустиме напруження.[3]

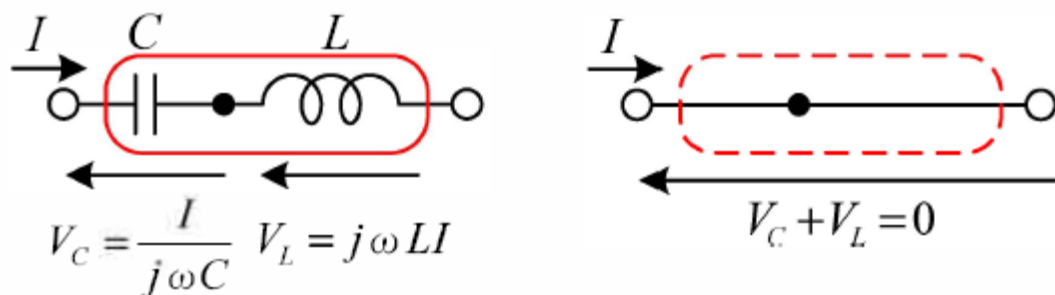


Рис. 1.6 Принципи LC компенсації

1.13. Резонансна ефективність і загальна ефективність

На рис. 1.7 показана система бездротової передачі енергії. Для того щоб говорити про ефективність, слід розрізняти загальну ефективність, яка відноситься до всієї системи, і резонансну ефективність, між резонаторами.[3] У методі електромагнітного резонансу, багато технологій спрямовані на резонансну ефективність між резонаторами. Однак, через наявність внутрішнього опору джерела енергії, схем випрямляча та інвертора, з'являються додаткові втрати енергії. Загальна ефективність стає нижчою, ніж резонансна ефективність. Більш того, так само необхідно розуміти, що вихідна потужність при навантаженні, це і є загальна ефективність. Для того щоб збільшити загальну ефективність всієї системи, необхідно забезпечити високу резонансну ефективність між резонаторами, але, якщо вихідна енергія і загальна ефективність низькі, то ця схема не підходить для практичного використання.

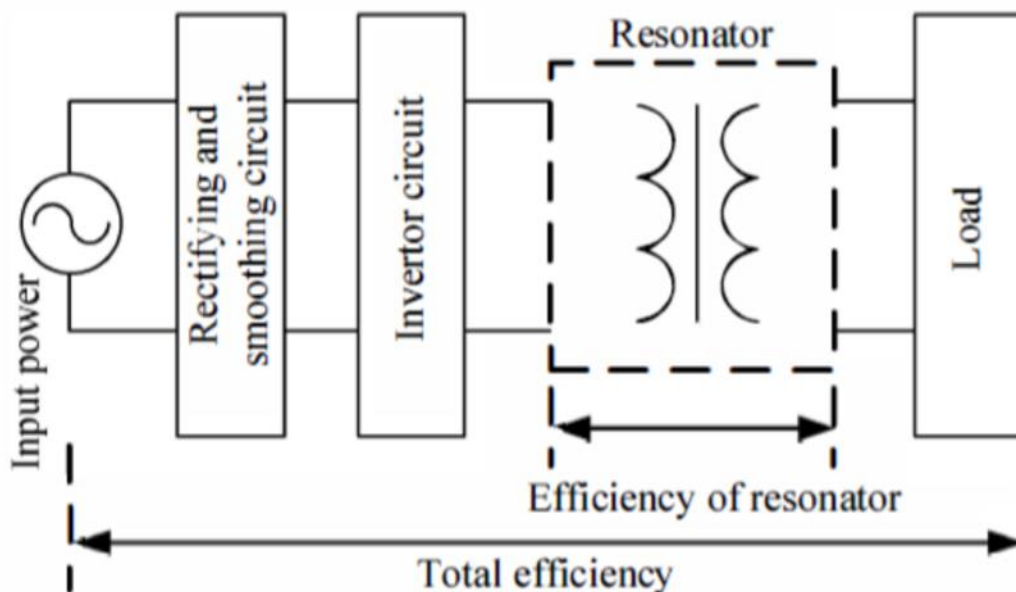


Рис. 1.7 Схема бездротової передачі енергії

Висновки

Розглянуто способи передачі енергії різними способами та нині існуючі для цього установки. Коротко розглянуто ключові питання щодо передачі енергії високої потужності на великі відстані і питання короткострокової передачі енергії малої потужності та області їх застосування.

В підсумку можна зробити висновки, що застосування систем бездротової передачі енергії високої потужності на великі відстані головним чином підходить для сонячних супутників і зарядки віддалених елементів живлення. Система короткострокової бездротової передачі енергії малої потужності знайшла застосування в електроенергетичних системах для формування бездротових джерел живлення, в бездротових системах зарядки, а також, в медичних фізіологічних датчиках і діагностичних приладах та системах. Основна проблема бездротової передачі енергії високої потужності полягає в розробці приладів та пристроїв, які дозволять розширити можливості її практичного застосування, адже очікується, що попит на можливості, які вона може надати дуже зросте вже найближчим часом.

Експеримент PS і Nd:YAG вдало демонструє передачу енергії у вільному просторі (бездротова і безволоконна). Для демонстрації використовувався 200 Вт лазер безперервного випромінювання, як джерело променя, і PowerSphere, в якості приймача. На відстані 3 метри від лазера до приймача із потужності променя в 160 Вт PowerSphere генерує близько 19 Вт. Модель PowerSphere, використана для такого експерименту, обладнана новітніми вдосконаленими клітинами з великою концентрацією кремнію.

Заявлена ефективність лазерної установки рівна 14,2% повинна розглядатися в умовах:

- Кремнієві клітини не надто підходять на хвилі довжиною 1064 нм.

- Стандартне противідбиваюче покриття для тестових клітин всередині PoweSphere має відбиваючу здатність приблизно 15% для 1064 нм.
- Щільність потоку всередині сфери на 30% менше, ніж щільність сонячного потоку, хоча клітини підходять для сприйняття світла 500 сонць.
- Клітинна популяція всередині сфери становить лише 24%, сильно скорочуючи ефективність використання фотонів.

З огляду на ці факти, результати експерименту можна вважати сприятливими, якщо, з поправкою на ці обмежені фактори, PowerSphere, обладнана вдосконаленими клітинами, буде перетворювати випромінювання Nd:YAG лазера в електрику, з ефективністю 40%.

Програма по оптимізації систем PoweSphere включає в себе розробку і розвиток нових енергетичних щілин, що створюють тип клітин, які оптимально відповідають частоті роботи Nd:YAG лазера. Для подальших розробок PowerSphere, оснащених налаштованими по частоті клітинами, аналітична модель має на увазі ККД перетворення на рівні 60%-65%. Справжній лазер має низьку ефективність, рівну всього декільком відсоткам. Для збільшення загальної ефективності також важливо поліпшити ефективність лазера самого по собі. В цьому напрямі хороший прогрес спостерігається в додаванні твердотільного діода в Nd:YAG лазер.

На підставі вищевикладеної інформації з першого розділу, можна виділити такий висновок: що самим оптимальним і найменш затратним способом по бездротовій передачі енергії для дослідження бездротової зарядки електромобіля, є спосіб заснований на принципі електромагнітної індукції.

2. МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ БЕЗДРОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

2.1. Принцип дії бездротової передачі електроенергії на основі явища електромагнітної індукції

Кожен з перерахованих вище методів передачі електроенергії має свої особливості, проте використання технологій бездротової передачі електроенергії за допомогою явища електромагнітної індукції найбільшого поширення набули в електротехніці.

Залежно від того, де розташовано джерело випромінювання, область поширення електромагнітного поля можна розділити на дві основні зони: ближня і дальня зони. Ближня зона - зона індукції, обмежується відстанню рівним $\Lambda \pi/2$, де Λ - довжина хвилі наведена на рис. 2.1. Також на кордоні розділу ближньої і далекої зон існує перехідна проміжна зона, в якій зона індукції, тобто ближня зона переходить в зону випромінювання.[1]

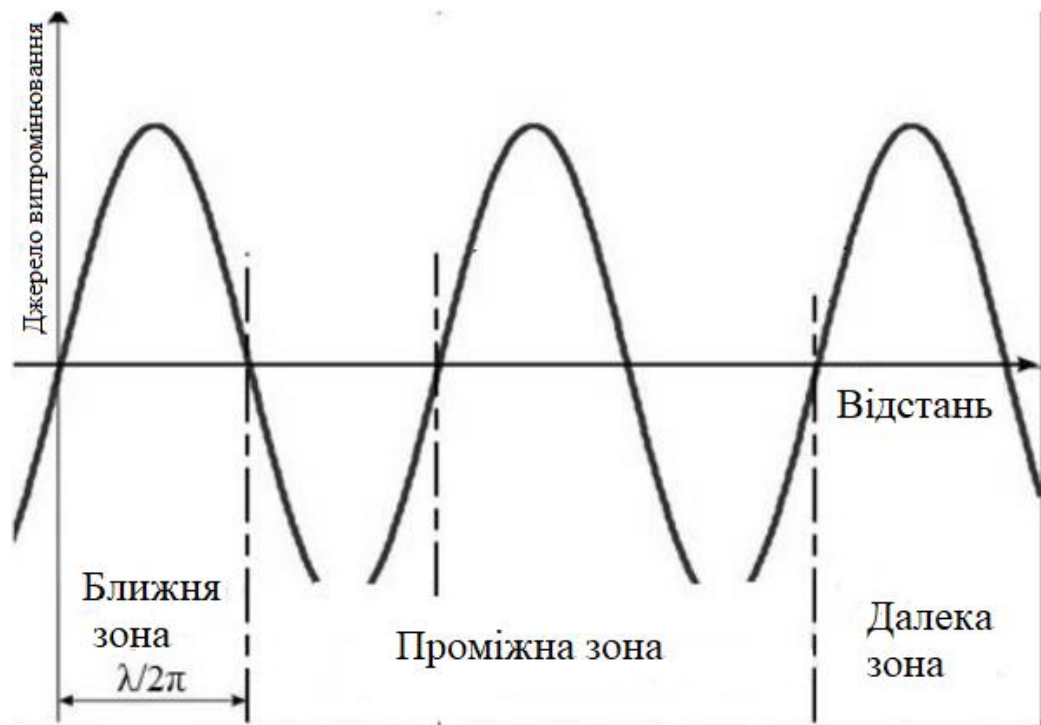


Рис. 2.1 Поширення електромагнітної хвилі. Ближня і дальня зони.

Протяжність ближньої зони розраховується за формулою згідно:

$$\Lambda = \frac{c}{f}, (2.1)$$

де, c - швидкість світла, рівна $3 \cdot 10^8$ м/с;

f - частота поширення електромагнітної хвилі, Гц.

Наприклад, при частотах електромагнітної хвилі 1, 10 і 100 МГц протяжність ближньої зони складе приблизно 300, 30 і 3 м відповідно. Розглянемо більш докладно явище електромагнітної індукції, яке використовується в системах бездротової передачі енергії від джерела живлення до приймача, на прикладі індуктивно зв'язаних елементів ланцюга.[1-2]

Передачу енергії можна представити у вигляді двох індуктивно пов'язаних котушок. Коли електричний струм в першій котушці змінюється, змінюваний струм створює змінне магнітне поле. Друга котушка в доступному для нього магнітному полі буде відчувати ці зміни магнітного поля, як зміни пов'язаного з ним магнітного потоку $d\Phi_B/dt$. Електрорушійна сила, що виникає в другій петлі, називається індукованою електрорушійною силою (ЕРС) або ЕРС трансформатора. Якщо два кінця цієї петлі зв'язати через електричне навантаження, то через неї потече струм.

2.2. Індуктивно пов'язані елементи ланцюга

При наявності в безпосередній близькості двох котушок індуктивності, в останній котушці завдяки індукції буде з'являтися ЕРС взаємоіндукції, що визначається згідно із законом Фарадея - Максвелла. Таким чином, між котушками встановиться індуктивний зв'язок, схема якого наведена на рис. 2.2.

Система складається з первинного ланцюга L_1 (джерело живлення) і вторинного ланцюга L_2 (приймач котушка). При протіканні змінного струму в первинному ланцюгу утворюється магнітне поле, яке в свою чергу індукує

напругу в приймачі ланцюга, яке використовують як джерело енергії для зарядки акумуляторів, або для живлення пристроїв. У міру віддалення приймача котушки від джерела живлення основна частина магнітного поля розсіюється і не пронизує лініями магнітного поля приймач котушки. Таким чином, навіть при дуже малих відстанях такий зв'язок між котушками стає неефективним.[3]

Ступінь індуктивного зв'язку двох елементів ланцюга оцінюється коефіцієнтом індуктивного зв'язку, який описується наступним відношенням:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 * L_2}}, (2.2)$$

де, M - взаємна індуктивність елементів ланцюга;

L_1, L_2 - індуктивність першого і другого елементів ланцюга.

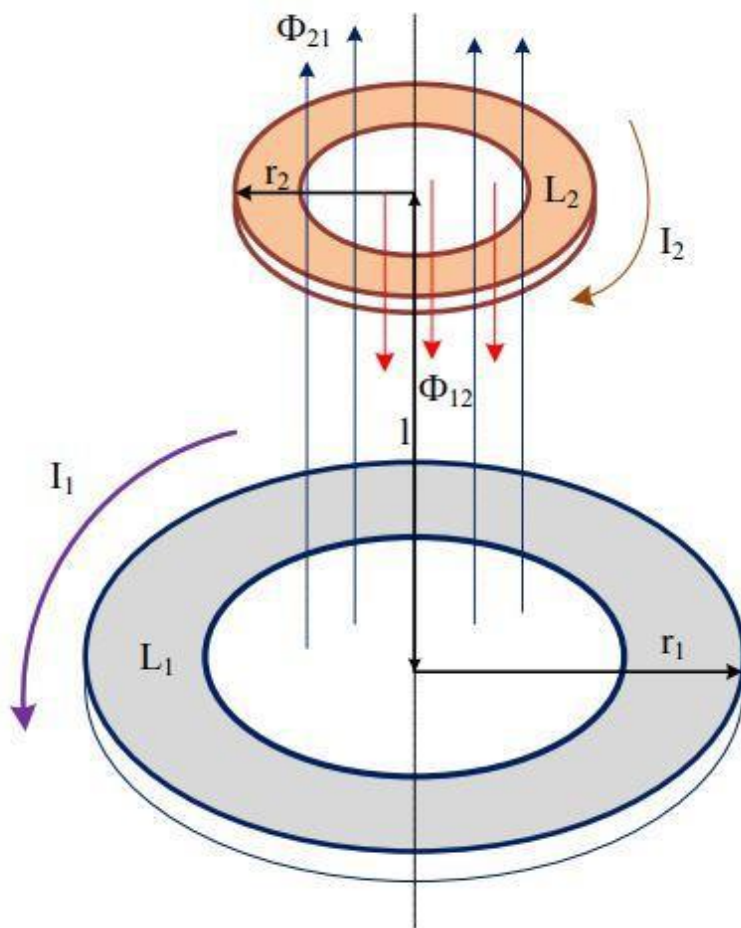


Рис. 2.2. Система двох індуктивно пов'язаних котушок

Коефіцієнт зв'язку залежить від багатьох факторів, таких як: відстань між котушками, співвідношення діаметрів первинної і вторинної котушок, розташування вторинної котушки щодо первинної, форми котушок (одиничне кільце або складна геометрія котушки) і т.д.

У практичних цілях витки двох котушок, так само як і різні витки однієї і тієї ж котушки, пронизуються неоднаковими магнітними потоками, і тому коефіцієнт індуктивності зв'язку $k < 1$.

Зміни індуктивного зв'язку між двома котушками можна досягти переміщенням однієї котушки щодо іншої, тобто значення k може змінюватися від 0 (відсутність зв'язку між котушками) до 1 (жорсткий зв'язок котушок).

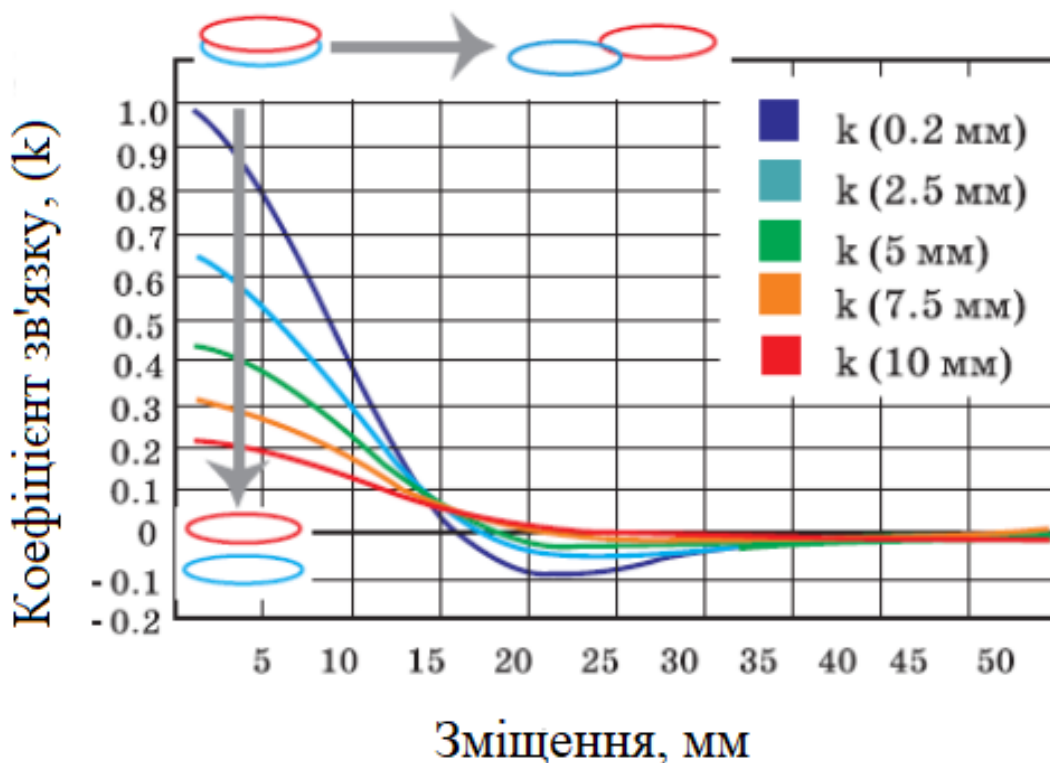


Рис. 2.3. Графіки залежності коефіцієнта зв'язку від зсуву котушок

Для збільшення ефективності передачі енергії між індуктивно пов'язаними контурами використовують резонансні контури з індуктивним зв'язком. Такі

системи застосовуються в різноманітних радіотехнічних пристроях протягом останніх десяти років. Розглянемо явище резонансу в індуктивно зв'язаних контурах.[2]

2.3. Резонанс в індуктивно зв'язаних контурах

У пристроях електроніки та радіотехніки поряд з поодинокими послідовними і паралельними контурами застосовуються і пов'язані контури. Контури можуть мати індуктивний зв'язок (трансформаторний або автотрансформаторний) або ємкисний різного виду. Розглянемо резонансні явища для випадку двох однакових контурів, що мають індуктивну (трансформаторний) зв'язок, наведений на рис. 2.4.

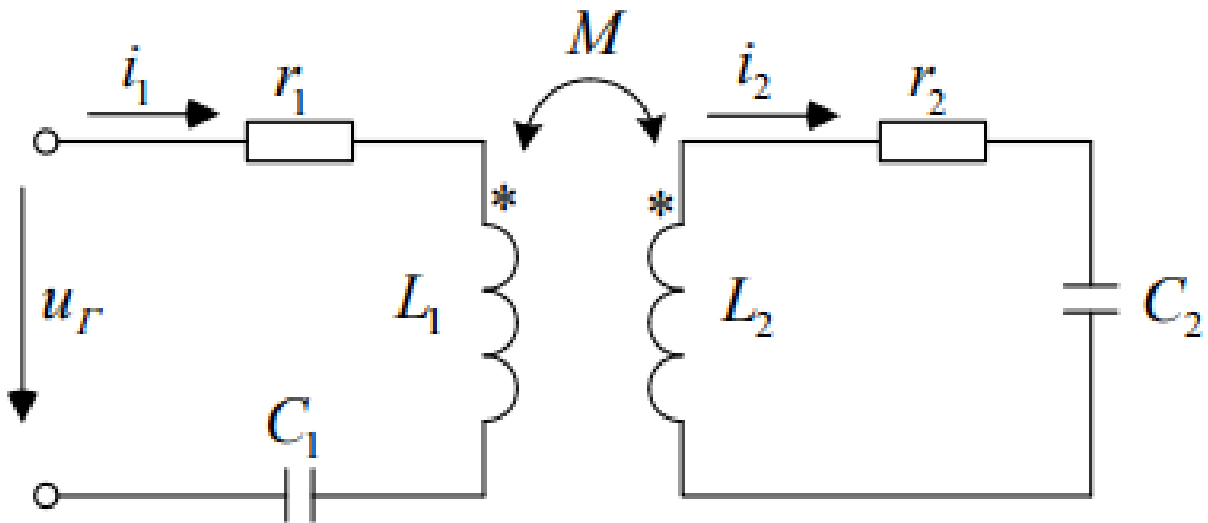


Рис.2.4. Спрощена еквівалентна схема індуктивно зв'язаних котушок

В електричній схемі індуктивно зв'язаних контурів (рис. 2.4) представлені наступні параметри:

де, i_1, i_2 - ток протікає по обмотці, А;

r_1, r_2 - активний опір провідника, Ом;

L_1, L_2 - індуктивність обмотки, Гн;

C_1, C_2 - ємність обмотки, Ф;

M - взаємна індуктивність елементів ланцюга;

u_r - напруга на джерелі, В.

Де індекс параметрів електричної схеми 1 і 2 позначає первинну і вторинну обмотку.

Режим ланцюга визначається двома рівняннями:

$$\begin{cases} (r + jx) * I_1 - j\omega M I_2 = U_1 \\ (r + jx) * I_2 - j\omega M I_1 = 0 \end{cases}, (2.3)$$

де, $x = \omega L - 1/\omega C$.

При частоті $\omega_1 = \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L*C}} = \omega_0$ у кожному контурі $x = 0$ (кожен налаштований в резонанс) – так званий “повний резонанс”.

$$\begin{cases} r * I_1 - j\omega M * I_2 = U_1 \\ r * I_2 - j\omega M * I_1 = 0 \end{cases},$$

$$I_2 = j\omega M * I_1 / r,$$

$$r * I_1 + \frac{\omega^2 * M^2}{r} * I_1 = U_1,$$

З (2.3) випливає, що струм $I_{1p} = r * U_1 / (r^2 + \omega_0^2 M^2)$, тобто, збігається за фазою з напругою U_1 , і ланцюг налаштований в резонанс. Струм у вторинній обмотці знаходиться як, $I_{2p} = j\omega_0 M * \frac{I_{1p}}{r} = \frac{j\omega_0 M}{r} * \frac{U_1 * r}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)} = \frac{j\omega_0 M * U_1}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}$,

При будь-якій іншій частоті з (2.3) струм у вторинній обмотці дорівнює:

$$I_2 = j\omega M * U_1 / [(r + jx)^2 + \omega^2 M^2],$$

У відносних одиницях:

$$\begin{aligned} \frac{I^2}{I_{2p}^2} &= \frac{j\omega M * U_1}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} * \frac{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}{j\omega_0 M * U_1} = \\ &= \frac{\omega}{\omega_0} * \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} = \omega_* * \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]}, (2.4) \end{aligned}$$

Тоді, поділивши чисельник і знаменник на r^2 , отримаємо:

$$\frac{I^2}{I_{2p}} = \omega_* * \frac{1 + \omega_0^2 M^2 / r^2}{(1 + jx/r)^2 + \omega^2 M^2 / r^2},$$

Так як $\frac{\omega_0}{r} = \frac{\omega_0 L}{r} * \frac{M}{L} = Q * k$,

де, $\omega_0 = \omega / \omega_0$ - відносна частота;

Q - добротність кожного з контурів;

$k = M / \sqrt{L_1 * L_2} = M / L$ - коефіцієнт зв'язку.

Отже, підставивши отримані многочлени в вираз (2.4) виходить наступний вираз:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \omega_* * \frac{1 + (k*Q)^2}{(1 + j\xi)^2 + (k*Q)^2},$$

де, ξ - узагальнена расстройка

$$\xi = \frac{x}{r} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{r} = \frac{\omega_* \omega_0 L - 1/\omega_* \omega_0 C}{r} = Q * (\omega_* - \frac{1}{\omega_*}),$$

У виразі (2.5) прийнято, що при побудові резонансної кривої контура з досить великою добротністю можна прийняти множник $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0} = 1$, і при обчисленні добротності Q рахувати $\omega L \approx \omega_0 L$, тоді резонансна крива описується наступним виразом:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1 + (k*Q)^2}{\sqrt{[1 - \xi^2 + (k*Q)^2]^2 + 4*\xi^2}},$$

Якщо $k * Q \ll 1$ - стала зв'язку контурів, то

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \xi^2)^2 + 4*\xi^2}} = \frac{1}{1 + \xi^2},$$

В цьому випадку, резонансна крива має один максимум при $\xi = 0$, тобто при $\omega = \omega_0$. Струм I_2 менше I_{2p} в $\sqrt{2}$ разів (межі смуги пропускання) при $\xi \pm 0.64$, а у послідовного контуру $I/I_p = 1/1 + \xi^2$, і на межах смуги пропускання рівні $\xi \pm 1$. [3]

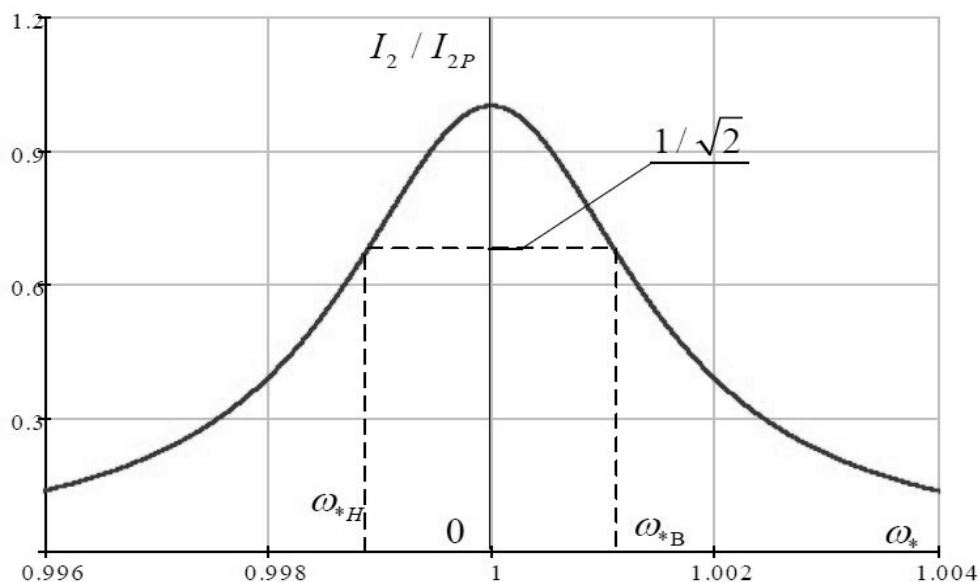


Рис.2.5. Частотна характеристика при слабкому зв'язку контурів

Отже, смуга пропускання пов'язаних контурів при слабкому зв'язку менша, ніж у послідовного контуру, наведеному на рис. 2.5. При $k * Q = 1$ - критичної зв'язку, то $\frac{I_2}{I_{2P}} = \frac{1+1}{\sqrt{(1-\xi^2+1)^2+4*\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2/4}}$.

У цьому випадку на межах смуги пропускання $\xi \pm \sqrt{2}$, тобто смуга пропускання більша, ніж у послідовного контуру, який наведено на рис. 2.6.

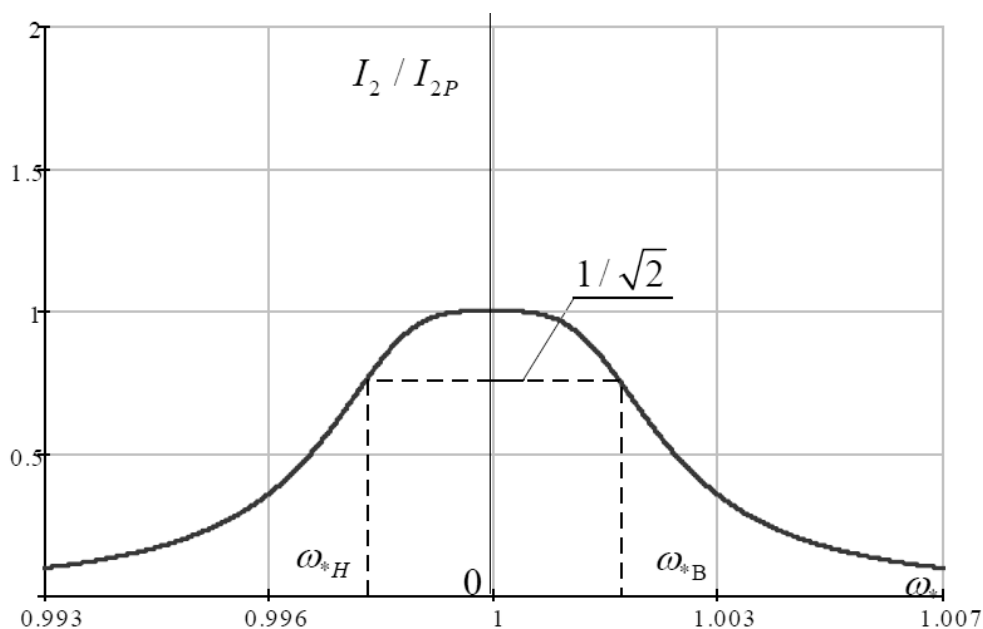


Рис.2.6. Частотна характеристика при критичному зв'язку контурів

Якщо $k * Q \ll 1$ - сильний зв'язок контурів, то виходить резонансна крива з двома максимумами, наведена на рис. 2.7. Якщо вважати, що на кордоні смуги пропускання значення струму I_2 , як і в послідовного контуру, в $\sqrt{2}$ разів менше максимального, то вийде смуга пропускання $\omega_{*B} - \omega_{*H}$ в 3.1 рази ширша і ближча до прямокутної, ніж у послідовного контуру при тій же добротності контурів, що може стати важливою перевагою ланцюга при побудові систем з великою пропускнуою здатністю (широкосмугових).[2-3]

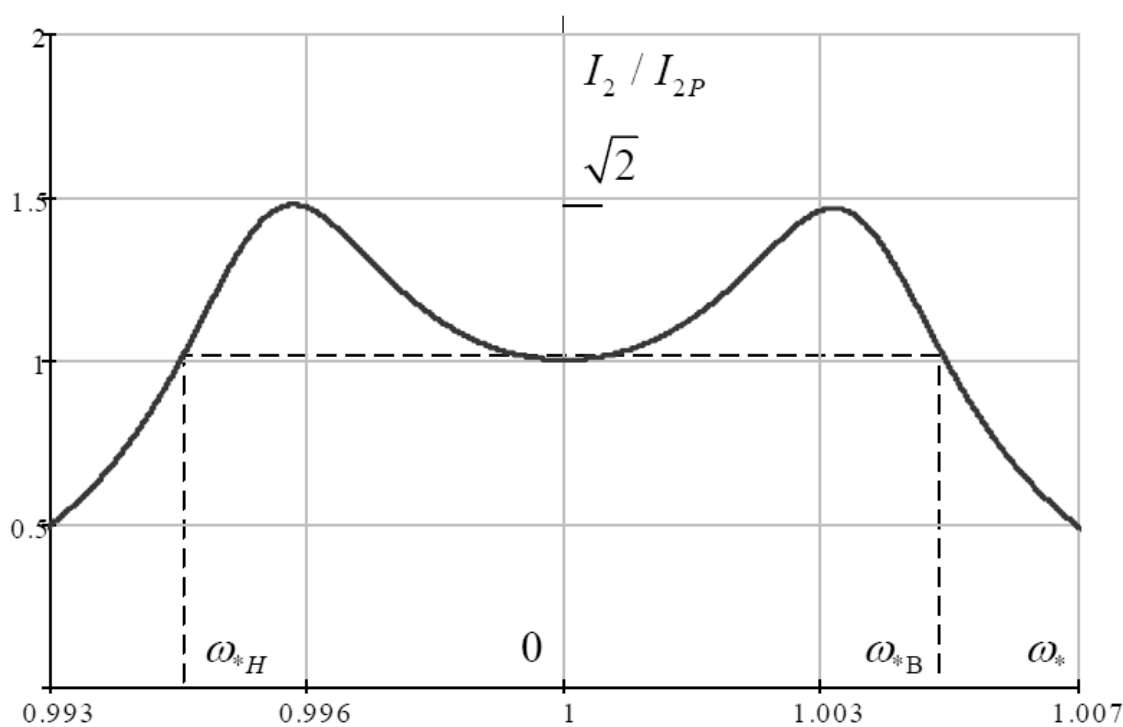


Рис.2.7. Частотна характеристика при сильному зв'язку контурів

Значення струму I_2 залежить від коефіцієнта зв'язку контурів. Найбільше значення можна знайти звичайним дослідженням на максимум. Воно виходить при $\omega_0 M = r$ та $I_{2p_{max}} = U_1 / 2r$. Узагальнюючи вищенаведені графіки частотних характеристик, слід вказати, що розглянутий ланцюг має «вибіркову властивість». Для оцінки вибіркової властивості ланцюга застосовують поняття ширини резонансної кривої або смуги пропускання контуру ($\omega_{*B} - \omega_{*H}$), яку, як правило,

визначають рознесенням верхньої і нижньої частот, при відношенні струмів $I/I_{2p} = 1/\sqrt{2}$.

Також, на формулу резонансної кривої впливає такий параметр ланцюга, як узагальнений розлад контуру щодо резонансної частоти ξ , яка повністю залежить від добротності контуру Q .

2.4. Індуктивний метод в якості безконтактної передачі енергії при зарядці електромобіля

Широко використовуваним видом відновлення електричної потужності автомобільних акумуляторних батарей є зарядні станції для електромобілів. Такі станції, безумовно, є лідерами в сфері відновлення заряду після його виснаження в системі акумуляування, але далеко не єдиними. Мінус таких енергопунктів в їх стаціонарності і недоступності в критичних ситуаціях при виснаженні рушійної енергії електротранспорту.

Рішенням даної проблеми може стати впровадження безконтактної зарядки автотранспорту шляхом застосування бездротових зарядних станцій вмонтованих в дорожнє полотно, робота яких заснована на такому принципі: електричний струм в момент руху його по дроті котушки-ретранслятора (панелі для бездротової зарядки) збуджує електромагнітне поле. Отримане таким чином поле є безпосереднім транспортувальником електроенергії від однієї котушки-передавача, що знаходиться на землі або ж змонтованої під ґрунтом поверхні до іншої, тобто, котушці-приймачі (індуктивному приймальному пристрої), розміщеному в нижній частині автомобіля, без будь-якого фізичного з'єднання, наведений на рис. 2.8. [3]

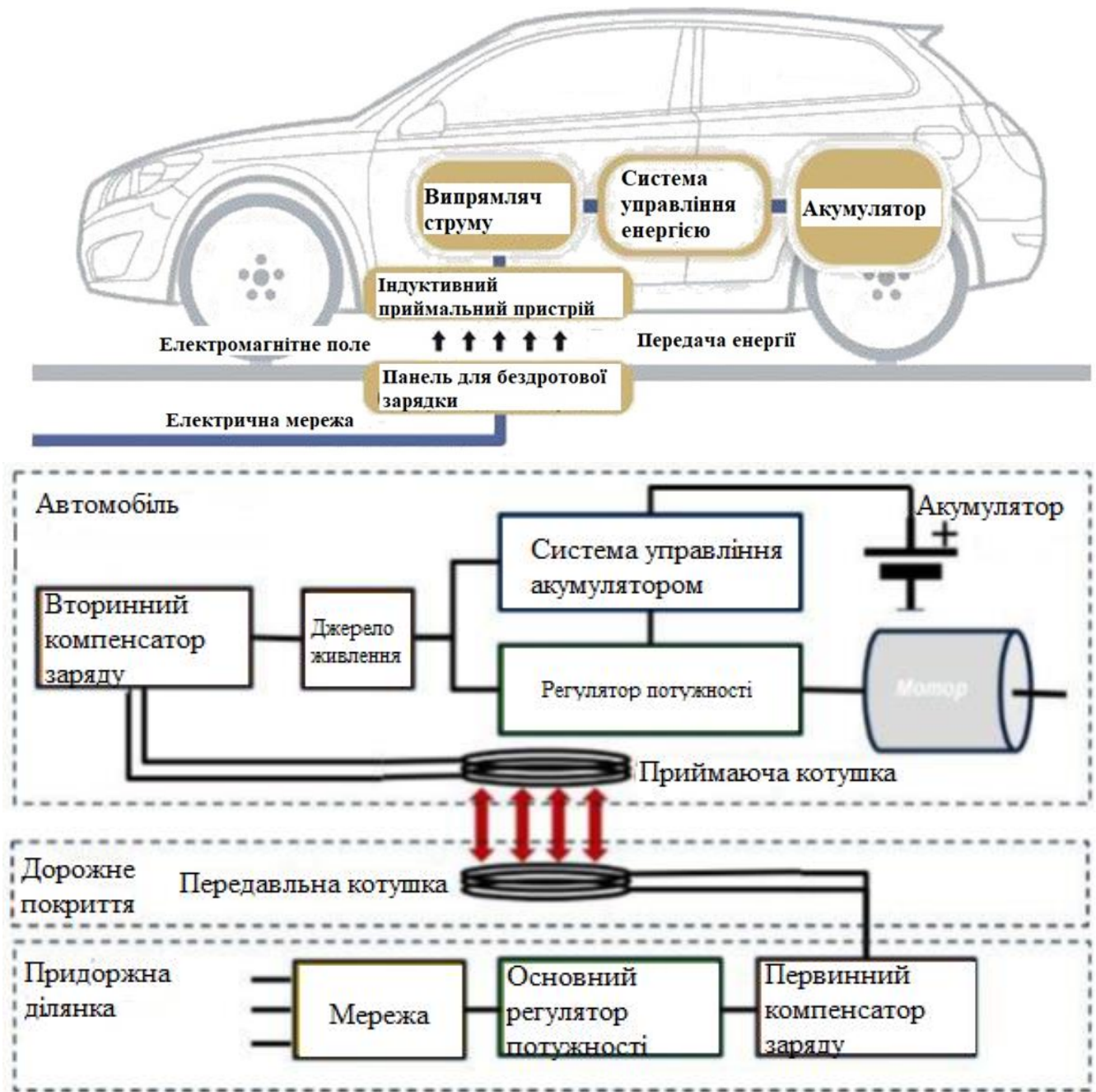


Рис 2.8. - Принципова схема бездротової зарядної станції.

Після протікання наведених процесів електроенергія, пройшовши через випрямляч струму, запасється безпосередньо в батареї завдяки системі управління енергією. На сьогодні технології бездротової зарядки електрокара потужністю 50 кВт дозволяють в повній мірі поповнити заряд акумулятора протягом 2,5 годин. [3]

Дана інноваційна система зарядки може бути абсолютно незалежною від виконавчо-ходової автоматики автомобіля. Таким чином, проблеми втрати струму і короткі замикання абсолютно виключені. Також відсутня проблема дискомфорту роботи з кабелями, до того ж даний блок бездротової зарядки здатний підтримувати заряд акумуляторної системи в самій екстремальній ситуації, або просто в місці паркування. Додатково до всього, використовуються магнітні поля високої частоти в якості транспортування енергії, що передаються через повітряний проміжок близько 160 мм, сконцентровані і екрановані від впливу на них сторонніх полів-витоків, які стрімко загасають на рівнях менших гранично допустимих значень в громадських місцях.

Основною деталлю дистанційних зарядних станцій - є застосування радіозв'язку для взаємодії з каналом зворотнього зв'язку регулятора потужності з доповненими алгоритмами програмного управління.

Технічним завданням є уніфікація автоматичних систем зі збереженням конструкції приймаючої сторони, запрограмованої транслювати котушки, а також відновлення, вибірка і організація системи зберігання рекуперативної енергії. На даний момент вдосконалюється ефективність котушок, силової електроніки перетворювача і систем зв'язку.

Сутність передачі енергії від транслятора до приймача полягає в використанні резонансу електромагнітного поля індуктивним способом. Останні дослідження засвідчили, що передача електроенергії потужністю 10 кВт через повітряний прошарок на відстані 160 мм типу «dc-to-dc» становить втрати лише 5% від загальної кількості. При передачі енергії від котушки до котушки «coil-to-coil», ефективність становить 90%, а при передачі типу «end-to-end» до 85%, що свідчить про високі показники коефіцієнта корисної дії системи. [3]

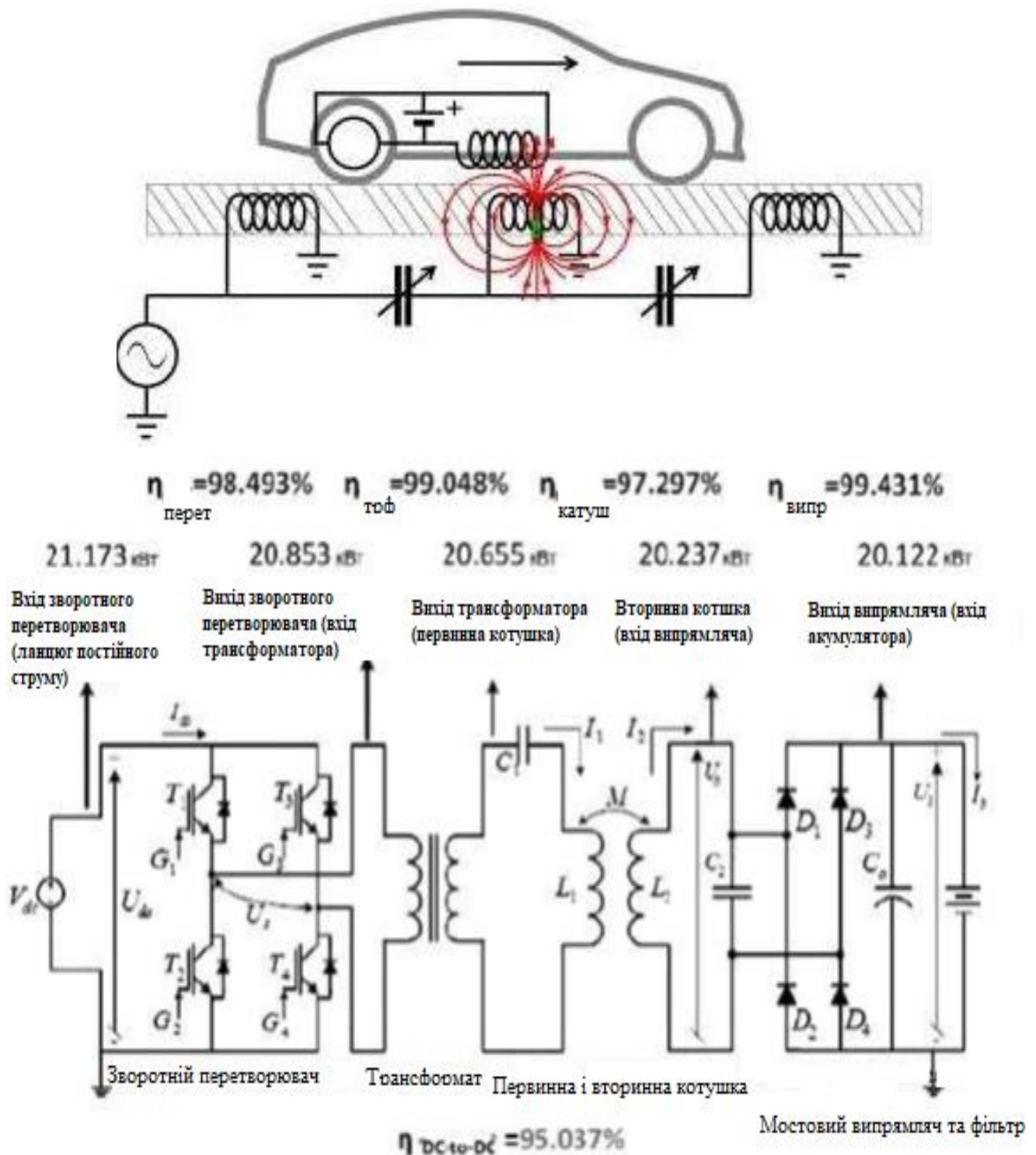


Рис 2.9. Схема системи безконтактного транспортування електроенергії

На рис. 2.9. продемонстрована блок-схема вихідної системи безконтактного транспортування електроенергії.

Представлена конструкція бездротової передачі заряду складається з конденсатора, первинного випрямляча, що виконує коригування коефіцієнта потужності одночасно перетворювача і трансформатора енергії, а також первинної котушки. Вторинна приймаюча котушка, розташована в корпусі електромобіля, включає в себе підлаштування конденсатор, високочастотний діодний випрямляч і конденсатор, який є фільтром системи. [3]

У ролі активного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності, який наведено на рис. 2.10, задіяна лише ліва його частина, права ж використовується в якості діода. Дана конструкція форсує пікові значення напруги до 8-10 раз.

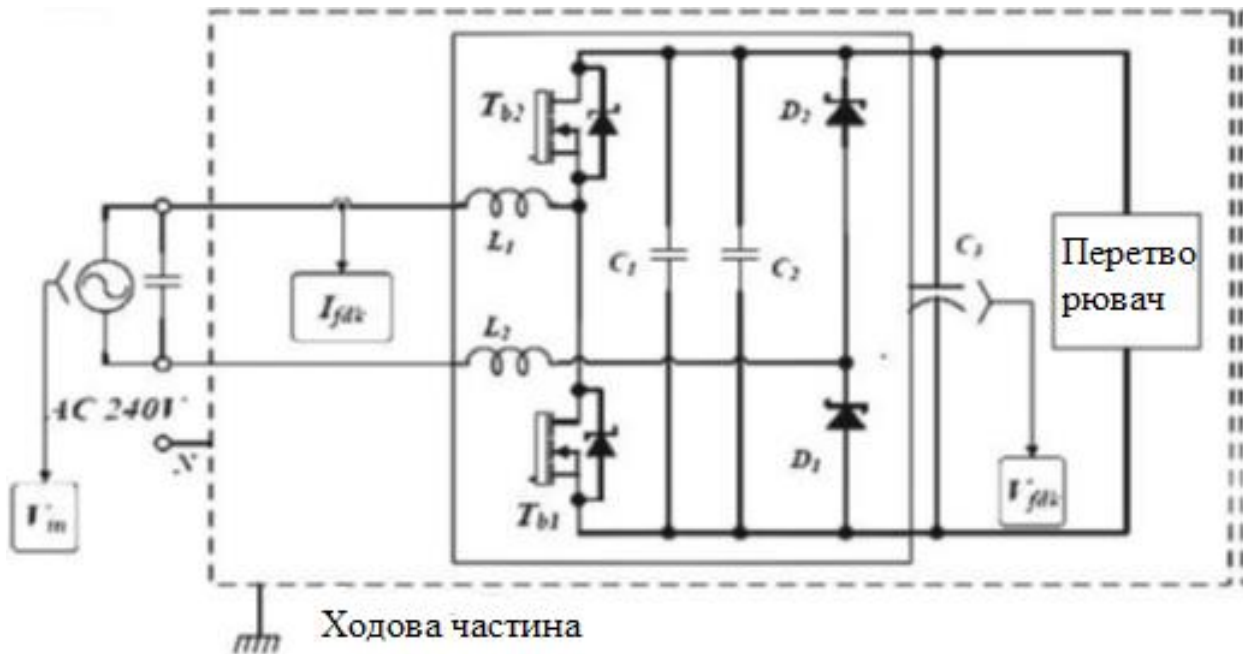


Рис 2.10. Блок-схема активного випрямляча струму.

2.5. Векторна ілюстрація збудження електромагнітного поля

Принцип дії електромагнітних котушок базується на векторній інтерпретації магнітного потенціалу в певній точці поля, порушеної протіканням первинного струму в первинній котушці, наведений на рис. 2.11.

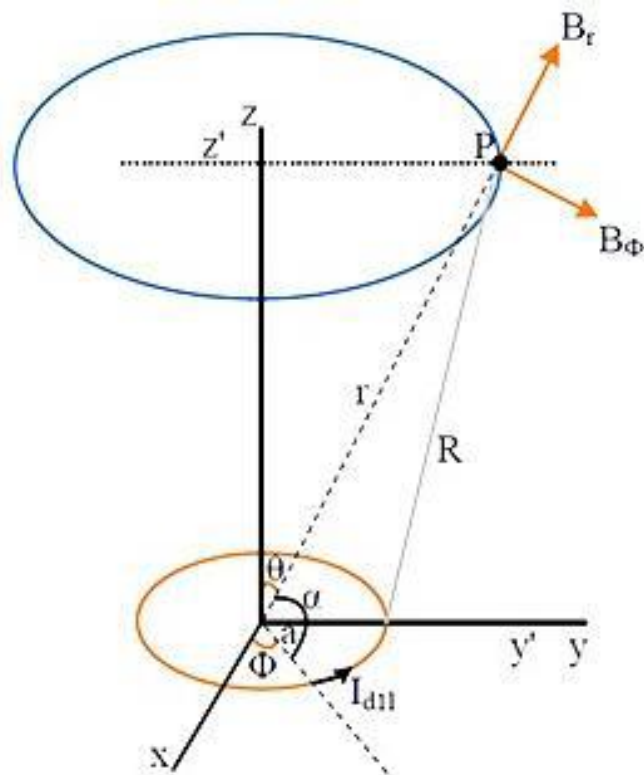


Рис 2.11. Векторна ілюстрація порушення електромагнітного поля.

Для приймаючої і транслюючої котушок з радіусами α , що є перетином провідника і мають відстань між котушками z , радіус вектор від первинної котушки до точки поля буде дорівнювати:

$$r = \sqrt{\alpha^2 + z^2}, (2.6)$$

У точці поля P вектор магнітного потенціалу B_{Φ}^{\rightarrow} залежить від вихідного радіусу первинної котушки, повного струму, куту нахилу витка θ і зворотного квадрату відстані між котушками. [3]

Незважаючи на ці залежності, щільність потоку $B = f(r; \theta)$ та повний потік енергії Φ сприймаючої котушки мають безпосереднє співвідношення до продуктивності зарядної установки і можуть бути визначені за формулою:

$$B(r; \theta) = r\mu_0 N_1 I_1 \alpha_1 (\cos\theta + \sin\theta), (2.7)$$

де, μ_0 - коефіцієнт потужності;

N_1 - первинне збудження в транслюючій котушці;

I_1 - сила струму в транслюючій котушці.

Навантажувальні параметри, а саме якісна і кількісна характеристики заряду батареї електромобіля і сталості поточкозчеплення між транслятором і приймачем, визначаються частотним відгуком системи бездротової зарядної установки. Підсумкове значення потужності електроенергії отриманої від приймача встановлюється частотою перемикання підсилювача заряду і робочим циклом вхідної напруги. Дана залежність виражається наступним чином:

$$U_1(t) = \frac{4U_{do}}{\pi} \sin\left(\frac{d\pi}{2}\right) \cos(\omega t), (2.8)$$

де, U_1 - напруга в транслюючій котушці;

U_{do} - напруга постійного струму на підсилювачі заряду;

d - коефіцієнт заповнення імпульсів;

ω - кутова частота.

Найчастіше напруга підсилювача заряду регулюється через ланцюг постійного струму за допомогою активного випрямляча. Кінцевою метою є досягнення найкращих експлуатаційних показників з точки зору потужності і ефективності при зміні частоти даного підсилювача.

Такі основні конструктивні та електромеханічні залежності бездротових зарядних пристроїв в передачі електроенергії від мережевого забезпечення до кінцевого споживача системи акумулювання електроенергії електромобіля, які передбачають найкращу на даний момент ефективність. Останніми напрацюваннями інженерів з автомобілебудування стали кілька варіантів таких конструкцій.

Безконтактна зарядна станція «WiTricity» створена для відновлення заряду шляхом транспортування електроенергії, задіюючи змінний магнітний вплив за допомогою резонатора, що порушує магнітне поле в діапазоні 300 кГц до 20 МГц. Доставка електроенергії здійснюється передавачем, що монтується в підлозі

споруди. За отримання відповідає приймач, встановлений безпосередньо в електротранспорті. Схожий варіант зарядної установки «Wireless Electric Vehicle Charging» (WEVC) аналогічно базується на застосуванні варіанту збудника електроенергії змінного магнітного поля. Відмінністю цих конкуруючих систем стало розміщення мережевого адаптера не тільки в площині поверхні, але і безпосередньо в ґрунті опорного майданчика. Прийомна ж котушка розташовується безпосередньо на борту транспортного засобу. [3]

Висновки

В даний час використання технологій бездротової передачі енергії знаходить широке застосування в системі бездротової зарядки акумуляторних батарей або пристроїв, які вимагають частотої підзарядки. Поряд з багатьма методами бездротової передачі енергії, саме технології засновані на явищі електромагнітної індукції, набули найбільшого поширення серед споживачів. Для збільшення ефективності передачі енергії за допомогою двох індуктивно зв'язаних контурів використовують резонансні індуктивні ланцюги. Коефіцієнт індуктивного зв'язку k , яким характеризується система індуктивно зв'язаних контурів, залежить від відстані між котушками 1, співвідношення діаметрів первинної і вторинної котушок, розташуванням вторинної котушки щодо первинної, форми котушок (одиничне кільце або складна геометрія котушки) і т.д. При слабкому зв'язку контурів, коли частотна характеристика коефіцієнта зв'язку і добротності контуру набагато менша 1 (рис. 2.5), чітко спостерігається властивість вибіркості контуру, тобто при досить високій добротності контуру, пік резонансної кривої стає гострішим, чим обумовлюються кращі «вибіркові властивості» контуру.

3. ПРИНЦИП ДІЇ ІМПУЛСНОЇ БЕЗДРОТОВОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ АВТОМОБІЛЬНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

3.1. Бездротовий зарядний пристрій за стандартом WPC

Wireless Power Consortium (WPC) - це назва компанії, яка першою вивела на споживчий ринок бездротові зарядки та який розробила перший у світі стандарт бездротової зарядки. Структурну схему дії бездротової платформи від WPC наведено на рис 3.1. Для передачі електроенергії в ній використовується трансформатор. Особливість стандарту WPC в тому, що робоча частота підвищена до десятків кГц або навіть МГц. Це дозволяє рознести первинну і вторинну обмотки на деяку відстань і обійтися без феромагнітного сердечника, тому що щільність потоку енергії ЕМП зростає з частотою. Також зі зростанням частоти збільшуються технічні можливості концентрування ЕМП в обмеженій області.

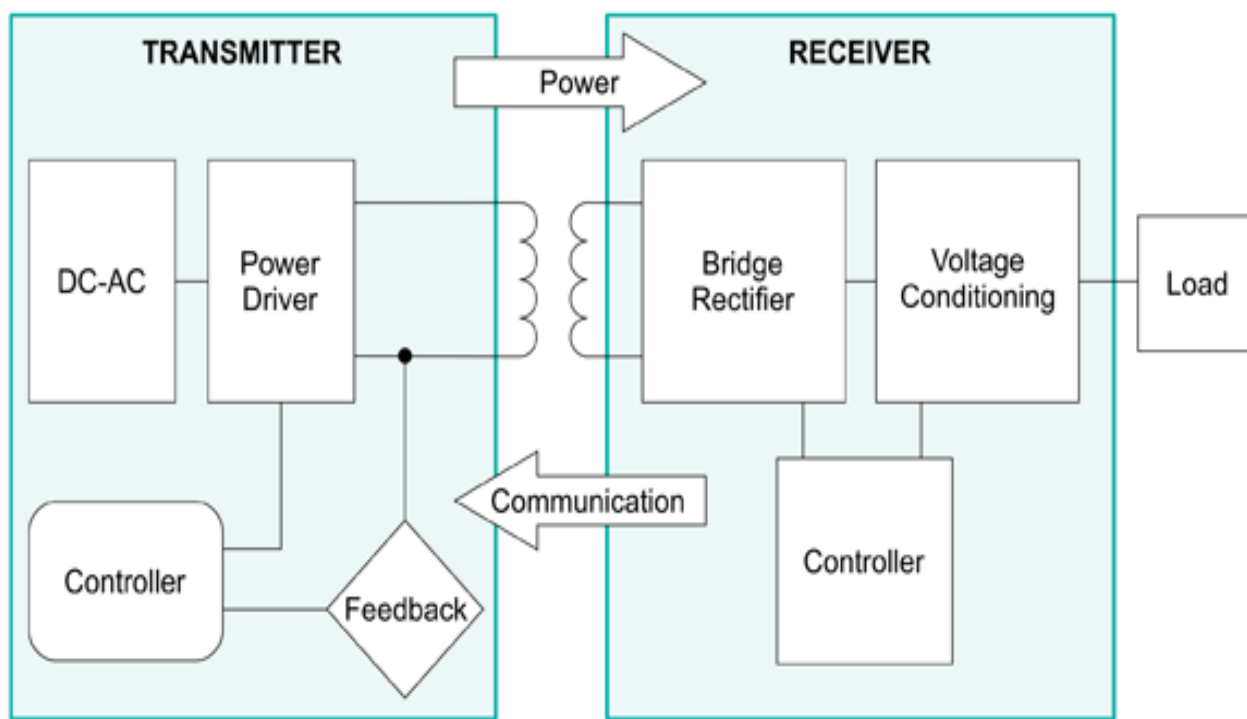


Рис. 3.1 Структурна схема бездротового зарядного пристрою за стандартом WPC

Але разом з тим з частотою зростає і біологічна дія ЕМП.

WPC - це не міжнародний стандарт, а галузевий. Тому характеристики бездротових платформ від WPC, можуть відрізнятися від платформ альтернативних виробників, щоб їх користувачі заряджалися тільки від «своїх» зарядки.

Пристрої розраховані на підзарядку по системі WPC, позначені піктограмою. Вона означає, що в апараті є приймальня котушка з 25 витків (рис 3.2) і перетворювач ВЧ змінного струму в постійний струм. Ряд бездротових платформ випускається у виконанні з WPC або без. Тоді індукційний приймач виноситься і розташовується під корпусом акумулятора, або робиться модульним. У будь-якому випадку під приймач WPC передбачається роз'єм, або контакти, куди він і підключається.



Рис. 3.2 Приймальня котушка за стандартом WPC

Підключення приймача за стандартом WPC відбувається під управлінням спеціального контролера, який спочатку визначає, наскільки акумулятор розряджений. Якщо більш ніж на 75%, то відразу подається максимальний струм для швидкого заряду, який може забезпечити зарядний пристрій. Якщо ні, то від зарядки береться струм, який вона здатна дати при падінні напруги на виході до 5 В.

3.2. Схема бездротової платформи за стандартом WPC

За стандартом WPC за основу схеми взаємодії передавача та приймача прийнято брати схему блокінг-генератора або просто блокінг.

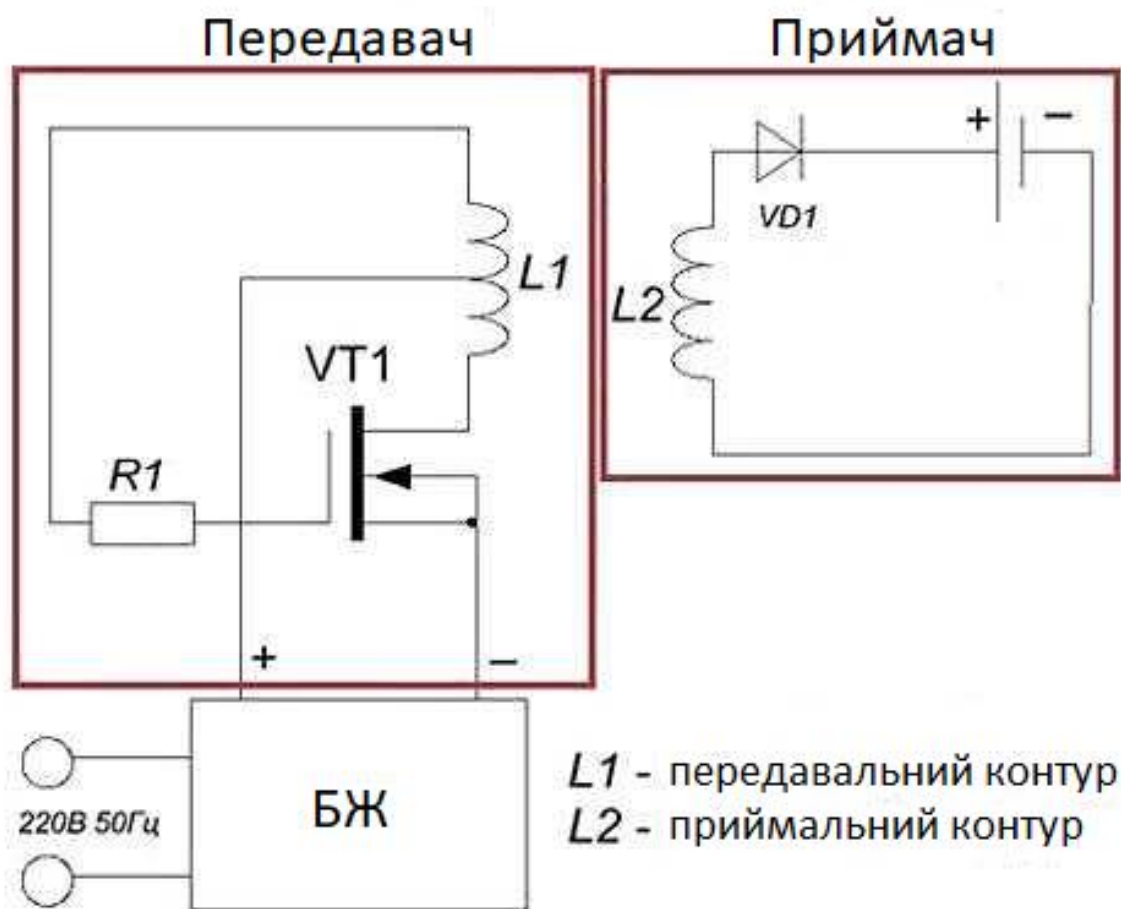


Рис. 3.3 Схема взаємодії передавача та приймача

Її перевага в простоті та у високому ККД. Але схема має і недоліки - майже повну відсутність реакції на навантаження: щоб зробити індуктор за схемою блокінга чутливим до акумулятора, потрібна досить складна додаткова автоматика. Ще один недолік схеми блокінга - він генерує короткі імпульси з дуже широким спектром, що сильно ускладнює боротьбу з паразитним випромінюванням. Відомі також випадки пошкодження акумуляторів надмірно потужною зарядкою за схемою блокінга: якщо підносити акумулятор до платформи плавно, все нормально, а якщо піднести його різко, то контролер заряду виходить з ладу.

Щоб нівелювати ці недоліки, до бездротової платформи додають автогенератор гармонійних коливань зі слабким індуктивним зв'язком. А ось недоліки автогенератора зі слабким зв'язком, або усуваються сучасною елементною базою і схемотехнікою, або не критичні для даної платформи. Так як на початку заряду споживана потужність досягає великих значень, потрібне окреме джерело живлення.

3.3. Особливості конструкції бездротового зарядного пристрою

Електрична принципова схема бездротового зарядного пристрою на генераторі з індуктивним зв'язком приведено на рис. 3.4.

Зліва розташований передавач, а праворуч приймач. Особливості схеми, по-перше, потужний активний елемент VT3. Ним може бути тільки підсилюючий польовий транзистор. У генератора на біполярному транзисторі буде низький ККД, а потужні польові ключі серій IRF, IRFZ, IRL з комп'ютерних БЖ або систем електронного запалювання в активному режимі не працюють.

По друге - ланцюг автозміщення VD3 C3. У потужних підсилюючих польових транзисторів початковий струм стоку може досягати 100-200 мА і більше. Без замикаючого потенціалу на затворі генератора, його можливо буде

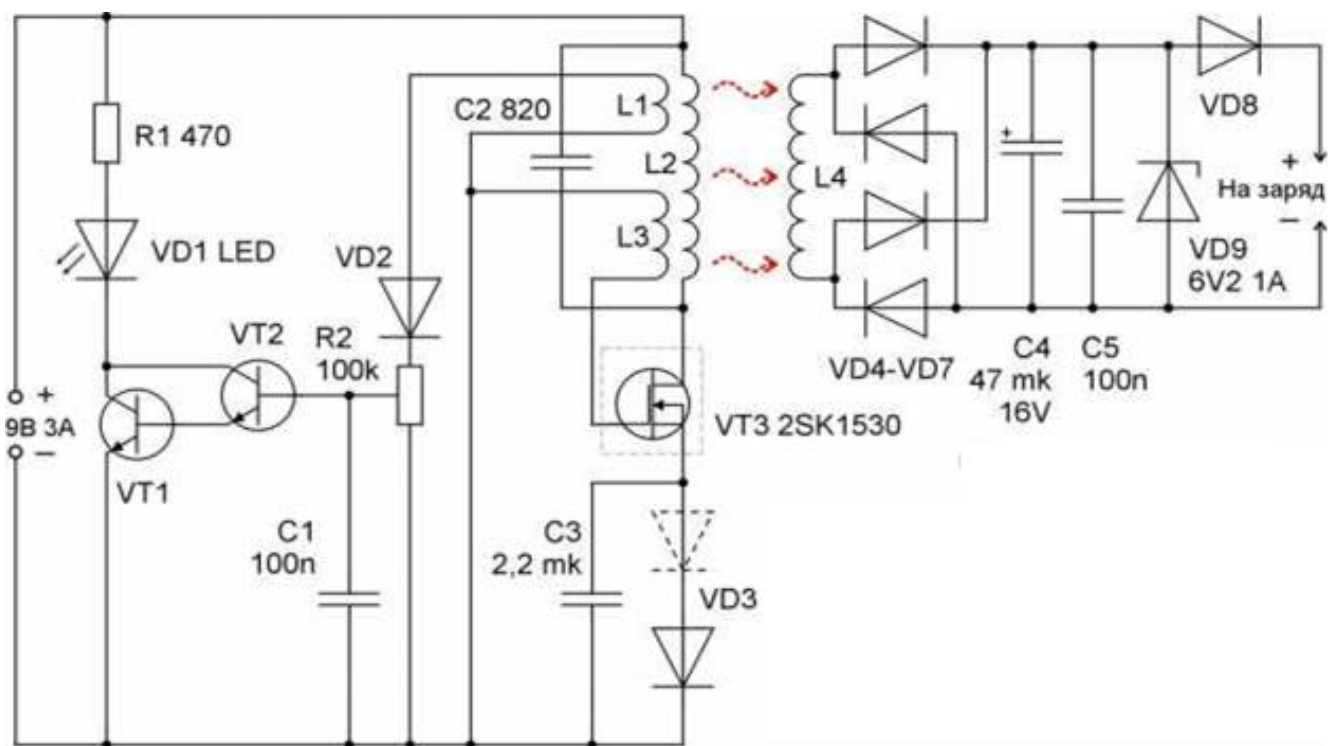


Рис. 3.4 Електрична принципова схема

встановити лише на потужність чи черговий режим, але не на те й інше, причому ППЕ від індуктора в радіусі дотику напевно перевершить допустиму величину. Але формувати автозміщення включенням резистора в ланцюг виток, як в ланцюг катода в лампових підсилювачах, теж не можна, генератор не вийде на повну потужність, тому що з наростанням струму виток буде рости по абсолютній величині і зміщення. Тому ланцюг зміщення виконано нелінійно на діодах: на малих потужностях воно збільшується відповідно до току виток, що забезпечує «м'який» запуск генератора і його безпеку для будь-яких акумуляторів, а коли діоди увійдуть в насичення, зміщення стане близьким до фіксованого і дозволить генератору «розгойдатися на повну». Ланцюг зміщення підбирається в процесі налагодження з потужних випрямних дифузійних ВЧ діодів (структура PiN, КД213, КД2997) і діодів Шотткі (структура SMD) на струм від 6 А. Напруга насичення перших в діапазоні струмів 0,7-5 А змінюється в межах 1 1,4 В; друге - 0,4-0,6 В.

Елементи R1, VD1, VT1, VT2, C1, R2, VD2 і L1 складають схему індикації заряду. Якщо коефіцієнт передачі струму VT1 більше 80, то VT2 виключається, а R2 підключають до бази VT1. Конденсатор C3 обов'язково плівковий.

Приймач даної зарядки також має особливості.

Перша - двохнапівперіодне випрямлення прийнятого струму, тому що коливання гармонічні. Застосування даного пристрою для заряду гаджетів з вбудованою WPC це не перешкоджає тому, що в них прийнятий струм випрямляється теж доданим мостом, для кращого використання випромінювання індуктора.

Друга - паралельно накопичувальному електролітичному конденсатору C4 підключений керамічний C5. У «електролітів» велика власна індуктивність і значний тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$, що на робочих частотах зменшує ККД заряду. Шунтування «електроліту» «керамікою» зменшує час заряду примірно на 7%. Для акумулятора з батареєю на 3500 мА/год це складе близько півгодини.

Нарешті, діод VD8. Він захищає контролер заряду акумулятора, якщо його покладуть на індуктор підключеним до дротової зарядки. Контролер заряду все одно не пустить в батарею струм довше ніж передбачалося, але сам такого режиму і може не витримати. Якщо подібна ситуація виключена, то і VD8 виключається, тоді VD7 потрібен на напругу 5,6 В. Його робочий струм вказано з великим запасом тому, що максимальний струм заряду через нього ніколи не проходить внаслідок гострої реакції на навантаження генератора.

3.4. Застосування платформи за стандартом WPC в якості безконтактної передачі енергії електромобілям на проїжджих частинах

В даний час у Великобританії під активним впливом компанії «Highways England» запущений проект з будівництва дорожнього покриття з вбудованими

бездротовими зарядними пристроями, які дадуть можливість зарядки електротранспорту, оснащеного всім необхідним технічним обладнанням, в момент його руху дорогою від придорожного енергопостачання, який наведено на рис. 3.5. Даний проект, з огляду на успіх бездротової зарядної станції в стаціонарній експлуатації, є початком масштабного практичного застосування технології бездротового акумулювання електроенергії. Активні дії по впровадженню даної системи стали результатом економічного аналізу вигідності реалізації цієї ідеї з урахуванням проблем пов'язаних зі стандартизацією розробленого обладнання. Наведені розробки є лише початком інноваційної діяльності, але в разі успіху кампанії, планується розширити мережу подібних доріг, які базуються на максимальній відстані 25 кілометрів одна від одної. Тестування доріг завершиться одразу після їх будівництва, що і покаже доцільність цієї ідеї, або виявить її локальні недоліки, які вимагатимуть безпосереднього вирішення. [5]



Рис. 3.5. Фото дорожнього покриття з вбудованими бездротовими зарядними пристроями.

В результаті, дана інноваційна технологія, яка вирішує проблему тривалості експлуатації електротранспорту, долає основні перешкоджаючі бар'єри до його масового поширення - економічні, технічні та стандартизаційні, і дозволяє задуматися про пріоритет використання електротехнічного транспорту в якості альтернативного. [4]

У 2015 році у Великобританії був запропонований інший проект дороги для електромобілів, що передбачає бездротову підзарядку під час руху - Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT).

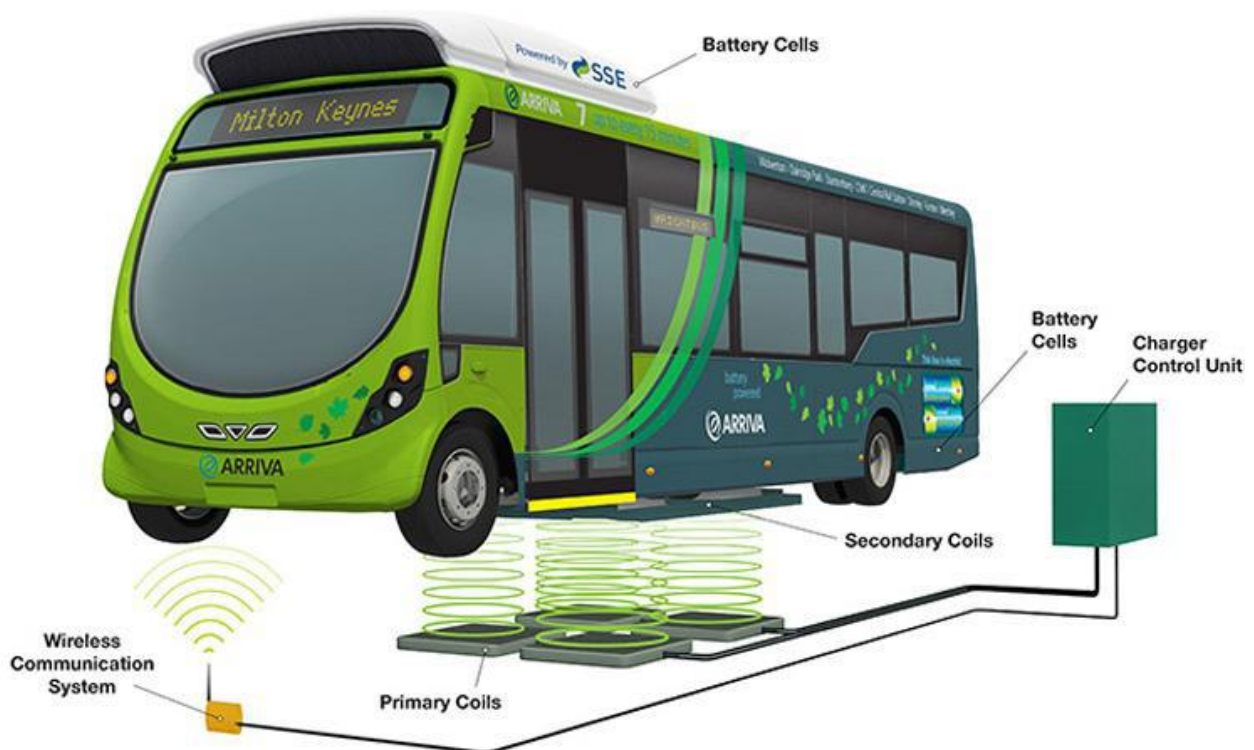


Рис. 3.6. Схема бездротової зарядки електричних автобусів, що експлуатуються в Мілтоні, Великобританія.

У неї закладено той же принцип, що і в бездротову зарядку для смартфонів: під трасою знаходяться котушки індуктивності, що створюють магнітне поле, в той час як конструкція машини передбачає переробку електромагнітних хвиль в електроенергію.

У 2013 році в місті Кумі в Південній Кореї була відкрита електрична дорога на дванадцять кілометрів, в якій використовується той же самий спосіб передачі електрики від траси до машини.

Цей же принцип був основним при розробці системи електродоріг The Slide-in Electric Road System, проектом якої займався концерн Volvo Group зі Швеції.

Також, у Великобританії, в найближчому майбутньому планується відкрити безліч нових зарядних станцій для електромобілів - приблизно кожні тридцять кілометрів дороги. Що й не дивно, адже в 2015 році кількість бажаючих придбати електрокари британців зросла на 60%, а в цьому році має зрости ще на 46% (за інформацією Bloomberg). [5]

Варто відзначити, що на даний момент в таких країнах, як Китай, США, Японія, Нідерланди, Великобританія, Франція, Німеччина і Норвегія вже існують 160 000 зарядних станцій для електромобілів.

Ізраїльський стартап ElectRoad почав будівництво дороги, яка заряджає електромобілі, в Тель-Авіві. Проект був запущений ще в вересні 2015 року, але для початку будівництва потрібен був ряд тестувань, який розробники проводили аж до початку 2017 року.

Дорога Electroad базується на принципі електромагнітної індукції, за яким працює дистанційна зарядка.

При будівництві дороги, під дорожнє полотно в траншею глибиною 8 см спеціальна техніка закладає прокладку з індукційною технологією. Дана технологія розроблена з застосуванням міді та гуми, тож затрати побудову таких доріг будуть невеликими. Після цього траншея накривається асфальтом. Інтелектуальні перетворювачі з онлайн комунікацією встановлені з боків дороги. Блок котушки кріпиться під електричним транспортним засобом і отримує енергію, передану через невеликий повітряний зазор. В результаті така зарядка може заряджати всі електрокари, батареї яких розташовані на висоті від 25 см. Випромінювання зведено до мінімуму, так як котушки локально екрановані від

водія і пасажирів для їх безпеки. Таким чином, будь-яку існуючу дорогу можна перетворити на таку, що підзаряджає.[4-5]



Рис. 3.7. Фото укладання індуктивних котушок в асфальт

Electroad планує зосередитися на громадському транспорті, перш ніж застосувати технологію для приватного транспорту. Старту успішно провів випробування своєї технології з електричним автобусом в Тель-Авіві і відкрив 20 метрів модернізованої електричної дороги за межами своєї лабораторії. [6]

В найближчому майбутньому компанія планує перевірити цю технологію на громадському електричному автобусі на одному з маршрутів в Тель-Авіві. Так як автобус буде їздити по електричним дорогам, його не потрібно буде підзаряджати, хоча він і буде мати невелику батарею для того, щоб такий автобус міг проїхати близько п'яти кілометрів без електричного живлення від дороги.

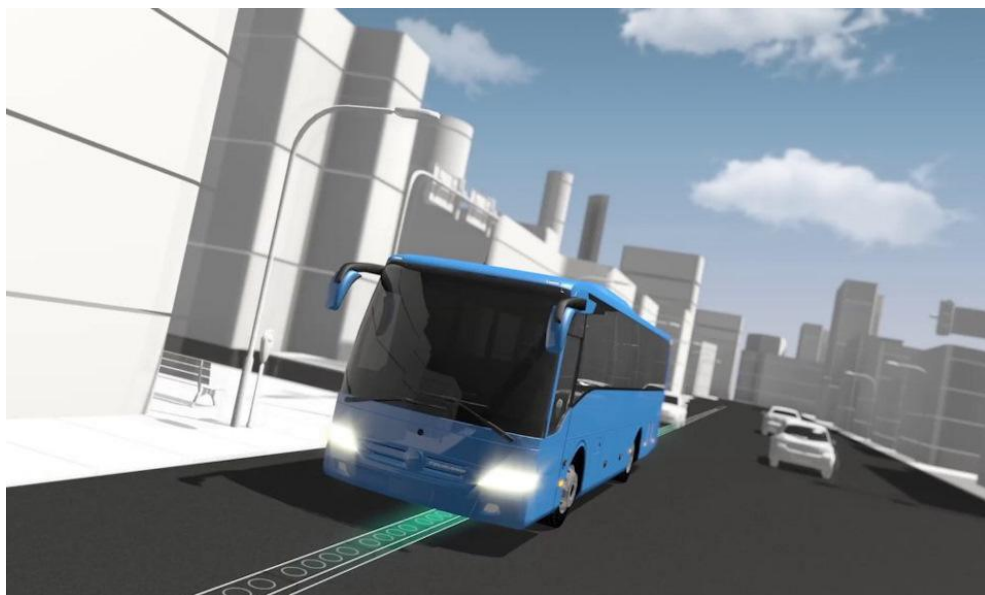


Рис. 3.8. Модель бездротової зарядки електричного автобуса Electroad, що експлуатуються в Тель-Авіві

Система бездротової зарядки на автомагістралях дає можливість забезпечити максимальну зручність для споживачів. Крім того, ця технологія дозволить реалізувати елементи автоматичного управління автомобілем, такі як слідування електромобіля заданим курсом по «віртуальних рейках», дотримання дистанції і т.д. Доведено можливість бездротової зарядки на швидкості до 100 км/год, що цілком відповідає швидкісному режиму на більшості автотрас.

Варто відзначити і її безпеку, так як відсутні електричні іскри, здатні викликати проблеми при зарядці в небезпечному середовищі. Крім того, немає залежності від якості електричних контактів: мастило, пил і корозія на контактах залишаються проблемами класичних методів зарядки.[7]

Компанія Toshiba вже приступила до експлуатаційних випробувань електричного автобуса з магнітно-резонансною зарядним пристроєм. Автобус японської марки Hino, з салоном на 45 місць, оснащений літій-титанатною батареєю, яку Toshiba просуває під торговою назвою Super Charge ion Battery (SCiB). Зараз цей транспортний засіб працює «човником» на 11-кілометровому маршруті між однією з філій авіакомпанії All Nippon Airways в Тономачі і

токійським аеропортом Ханеда. Безконтактна зарядка створена спільно з токійським університетом Васеда. «База» змонтована на місці для стоянки автобуса на одному рівні з асфальтом, а відповідна частина встановлена під днищем. Подібна система відрізняється від звичайних індукційних «зарядок», які застосовуються в мобільних телефонах.



Рис.3.9. Експериментальний автобус і його зарядна станція

Toshiba використовує явище магнітного резонансу - такий пристрій дозволяє передавати енергію на більшу відстань і є менш чутливим до взаємного розташування передавача і приймача. Запас ходу у автобуса становить 89 км, але повна зарядка триває всього 15 хвилин. З урахуванням того що в день цей експериментальний автобус робить всього три рейси, таких параметрів цілком достатньо для його «нормального життя».[8]

3.5. Безпека і вплив на здоров'я людини застосування безконтактних способів передачі енергії

Оскільки в системах бездротової зарядки не можна виключити електромагнітне випромінювання, виникає цілком доречне запитання, наскільки такі системи безпечні для здоров'я людини і чи не піддаватимуться люди впливу

великих і, цілком можливо, потенційно небезпечних для їх здоров'я електромагнітних полів при їх використанні.

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) відіграє провідну роль в розробці норм і узгоджених рекомендацій допустимих для людини рівнів електромагнітного опромінення. Разом з тим, існує ряд регіональних і міжнародних організацій, які в специфікаціях, створених відповідно до рекомендацій ВООЗ, регламентують рівні опромінення людини. У їх число входять Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), який є лідером в галузі розробки стандартів з електроніки та електротехніки (Піскавей, Нью-Джерсі, США) і Міжнародна комісія з неіонізуючих випромінювань (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP, штаб-квартира розташована в Німеччині). [7-8]

Одним з найважливіших показників, що визначає рівень електромагнітного опромінення шкідливого для людини, є рівень SAR (Specific Absorption Rate - питомий коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії). Він визначає рівень енергії електромагнітного поля, що поглинається тканинами тіла людини за одну секунду та викликає нагрівання цих тканин. Допустимі значення питомого коефіцієнту поглинання, рекомендовані Федеральною комісією зв'язку (Federal Communication Commission - FCC) і комісією ICNIRP, наведені в табл. 3.1, рекомендовані як норма та визначають допустимі значення SAR, які гарантують відсутність несприятливих наслідків для людини, незалежно від її віку і стану здоров'я, при впливі електромагнітного опромінення на різні ділянки тіла.

У наукових дослідженнях і доповідях, представлених як IEEE, так і ICNIRP, немає підтвердження того, що вплив радіочастотного (до 300 ГГц) електромагнітного поля викликає рак. Однак є безліч доказів того, що при електромагнітному опроміненні може підвищуватися температура тіла людини або окремих його ділянок (тканин, органів). Електромагнітне опромінення також може впливати на нерви і стимулювати м'язові тканини. Крім того,

електромагнітні поля мають несприятливий вплив на сітківку ока (тканин, органів).

Табл. 3.1 Рекомендовані значення питомих коефіцієнтів поглинання

Організація	Питомий коефіцієнт поглинання (SAR), Вт/кг		
	Все тіло	Голова, тулуб	Кінцівки
FCC	0.08	1.6 (1 г)	4.0 (10 г)
ICNIRP	0.08	2.0 (10 г)	4.0 (10 г)

В результаті численних досліджень (IEEE, ICNIRP) було визначено, що при впливі випромінювання навіть на найчутливіші ділянки тіла людини при середньому рівні SAR менше 4 Вт/кг негативний вплив не проявляється, проте воно може призводити до підвищення температури тіла максимум на один градус, при нормальних умовах навколишнього середовища. Проте, щоб забезпечити "запас міцності", який би компенсував, можливо, ще неповні наявні сьогодні наукові дані, а також, щоб заспокоїти громадську думку, IEEE і ICNIRP рекомендували встановити значення SAR на рівні менше 0.4 Вт/кг для працівників, зайнятих на виробництві, і 0.08 Вт/кг для масового споживача. Крім того, в табл. 3.1 наведені рекомендовані значення SAR для окремих ділянок тіла людини.

Конструкція і принцип роботи бездротових зарядних пристроїв забезпечують високу безпеку. Ефективний радіус дії, систем які випускаються сьогодні, не перевищує декількох міліметрів, а потужність електромагнітного випромінювання швидко загасає при віддаленні від джерела. Тому бездротові зарядні пристрої не небезпечніші, ніж звичайні мікрохвильові печі та мобільні телефони. [10]

Висновки

У межах розділу показано принцип дії імпульсної бездротової платформи для зарядки автомобільних акумуляторів за стандартом WPC. Наведено їх схемотехнічні рішення. Так само відображено використання платформи за стандартом WPC в якості безконтактної передачі енергії при зарядці електромобіля. Показані функціонуючі проекти використання даної платформи безпосередньо на дорогах загального користування.

4. Моделювання магнітних полів котушок та енергії між ними

4.1. Вибір програмного забезпечення

Comsol Multiphysics - програмне забезпечення, призначене для моделювання будь-яких фізичних процесів і вивчення різних фізичних явищ, їх взаємозв'язку з навколишнім середовищем і між ними.

Створення моделей, які описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних, проектування складних пристроїв і систем - головне завдання програмного пакета Comsol Multiphysics. Всі обчислення в програмі реалізуються на методі скінченних елементів (МСЕ).

Даний метод виник в результаті рішення задач космічної спрямованості радянськими вченими в 1936 році і згодом описаний такими вченими і інженерами, як Мелощ, Клаф, Мартін, Тернер та ін. В основі методу лежать дві головні ідеї: розбиття досліджуваного об'єкта на кінцеве число елементів - дискретизація і кусково-елементна апроксимація досліджуваних функцій.

Досліджувана область або тіло (конструкція) розбивається на безліч кінцевих елементів, які можуть мати різну форму і розміри (рис. 4.1). Результатом розбиття є сітка з меж кінцевих елементів.

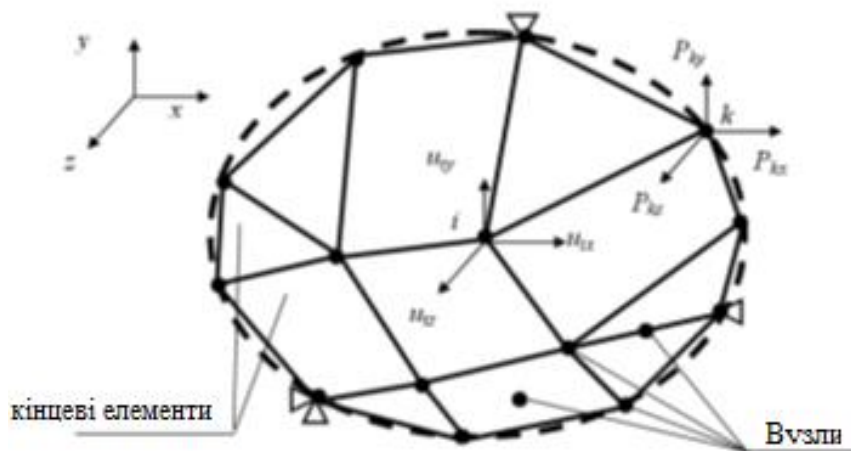


Рис. 4.1 Фрагмент кінцево-елементної моделі

У кожному з цих елементів довільним способом вибирається вид апроксимуючої функції, наприклад поліном першого ступеня. Поза елементом значення цієї функції дорівнює нулю, в той час як в самому елементі (в вузлах) значення функцій є рішенням поставленого завдання і заздалегідь невідомі. Залежно від кількості невідомих значень у вузлах, складається система лінійних алгебраїчних рівнянь.

4.2. Створення вихідної області та геометрії об'єктів

Постановка завдання дослідження зводиться до того, щоб отримати оптимальні параметри котушки для передачі енергії бездротовим шляхом з максимальною ефективністю на відстань, що не перевищує розміри кімнати. Передавальна котушка повинна мати такі розміри, щоб вона задовольняла умовам практичності і доцільності її установки.

У теоритичній частині було відзначено, що максимальна ефективність передачі енергії відбувається за умови резонансу зі слабким зв'язком між індуктивно пов'язаними котушками.

Таким чином, потрібно обчислити такі параметри: індуктивність і активний опір, залежні від частоти, і власну ємність котушки.

З метою спрощення розрахунків візьмемо котушку в формі одного кругового кільця радіусом $R = 0,25$ м виконаного з мідного дроту кругового перетину, що має радіус $r = 5$ мм (рис. 4.2).

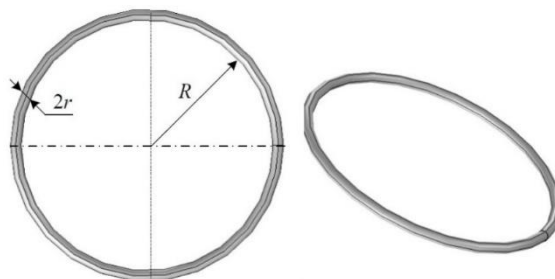


Рис. 4.2 Геометрія котушки з мідного дроту

Наступним етапом потрібно задати область, в якій відбудеться розбиття кільця на кінцеві елементи. Задаємо сферу довільного радіуса, усередині якої знаходиться досліджуване кільце (рис. 4.3).

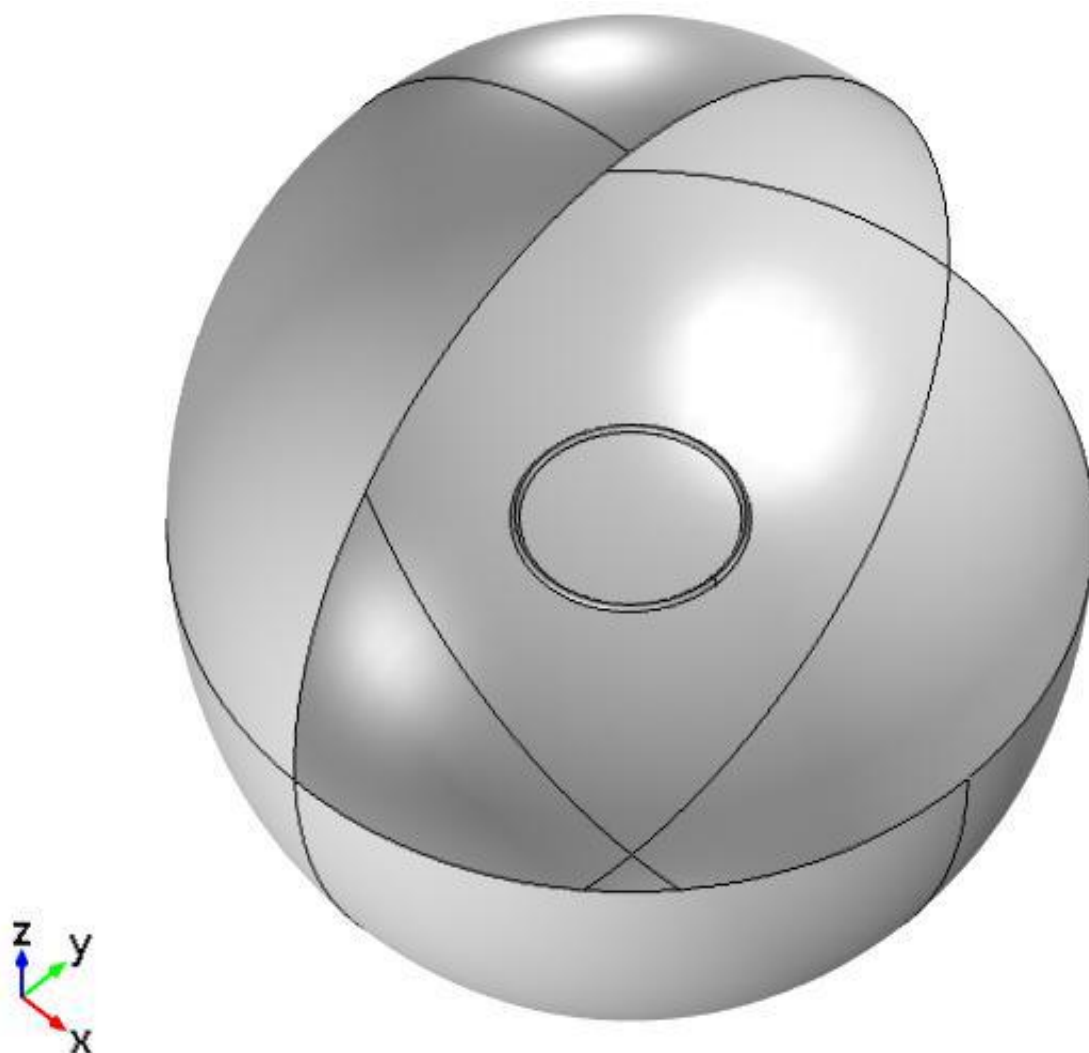


Рис. 4.3 Геометрична побудова моделі

Отримавши досліджувану область і об'єкт, потрібно створити сітку, яка використовується для дискретизації моделі при розрахунках методом кінцевих елементів. Модель розбивається на малі геометричні частини - в даному випадку розбивка відбувається на тетраедри (рис. 4.4).

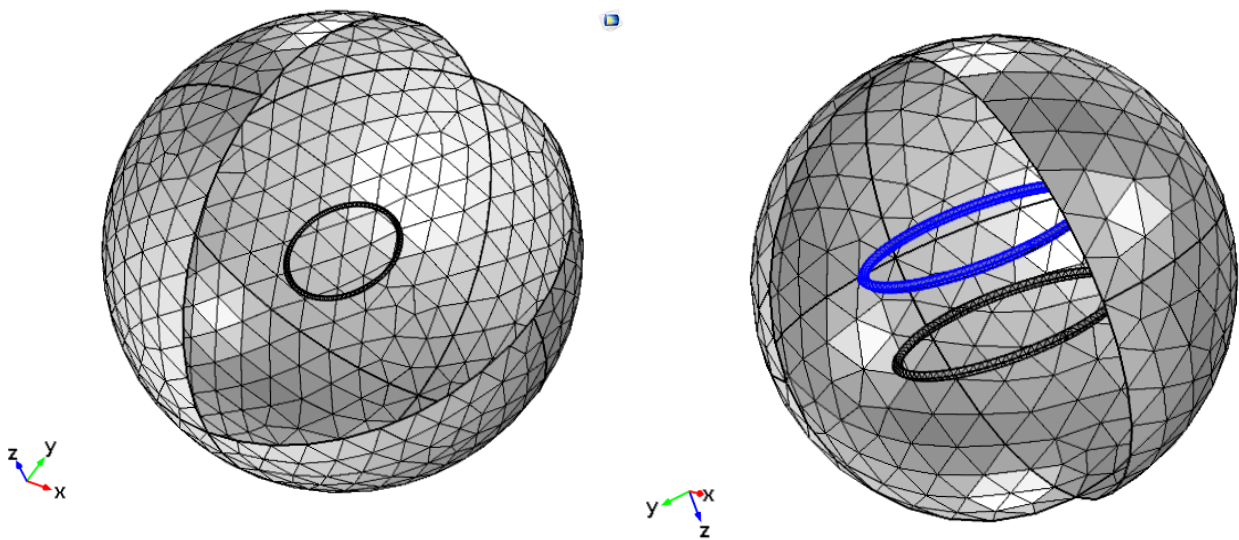


Рис. 4.4 Створення сітки моделі: а - в системі одного кільця;
б - система, що складається з двох кілець

4.3. Опис математичної моделі об'єкта дослідження

Для проведення розрахунку потрібно врахувати, що подача напруги на котушку від джерела живлення відбувається в високочастотному діапазоні, а отже, при подачі такої напруги на передавальну котушку, будуть протікати високочастотні струми таким чином, що щільність розподілу струму по перетину буде концентруватися поблизу поверхні котушки. Таке явище називається скін-ефектом і характеризує залежність опору і індуктивності від частоти.

Зробимо розрахунок щільності розподілу струму в поперечному перерізі провідника за допомогою системи рівнянь Максвелла, яка дозволяє отримати рівняння для векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} .

Рівняння для постійного струму, що зв'язує магнітну індукцію \mathbf{B} і векторний магнітний потенціал \mathbf{A} , описується виразом:

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} A_z - \frac{\partial}{\partial z} A_y \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} A_x - \frac{\partial}{\partial x} A_z \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_y - \frac{\partial}{\partial y} A_x \right), (4.1)$$

Рівняння для постійного струму, що зв'язує напруженість магнітного поля \mathbf{H} і вектор щільності струму \mathbf{J} , описується виразом:

$$\nabla \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{pmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) = \mathbf{J}, (4.2)$$

Сполучаючи вирази (4.1) і (4.2) отримуємо рівняння Пуассона для векторного потенціалу \mathbf{A} через щільність струму \mathbf{J} :

$$\Delta \mathbf{A} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{A} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{A} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{A} = \mathbf{J}, (4.3)$$

Для змінного струму, розв'язавши рівняння Гельмгольца щодо вираження (4.1) знаходимо такий вираз:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla \mathbf{H} = \mathbf{J}, (4.3)$$

де, $\omega = 2\pi f$ - кутова частота;

σ – питома електрична провідність провідника;

ε – діелектрична проникність речовини;

ε_0 – діелектрическая проникність в вакуумі.

Перетворимо вираз (4.3) в компактну форму запису, що зв'язує щільність струму \mathbf{J} і векторний магнітний потенціал \mathbf{A} :

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \mu\Delta \mathbf{A} = \mathbf{J}, (4.4)$$

де, μ – магнітна проникність.

При роботі з виразом (4.4) можна використовувати наступну компактну форму рівняння:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla * (\mu^{-1}\nabla * \mathbf{A}) = \frac{\sigma V}{2\pi r}, (4.5)$$

де, V – напруга, що подається на котушку.

Умова для завдання граничного значення вектора магнітного потенціалу на зовнішньому кордоні області моделі описується:

$$\mathbf{A}|_{\Gamma_{air}}, (4.6)$$

Після визначення розподілу величини магнітного потенціалу необхідно розрахувати щільність струму і струм у витку дроту за такими виразами:

$$\mathbf{J} = \nabla * (\mu^{-1}\nabla * \mathbf{A}), (4.7)$$

$$I = \pi \int_0^R J r^2 dr, (4.8)$$

Магнітна енергія обчислюється згідно з виразом:

$$W = 2\pi \oint \mathbf{A} r dr, (4.9)$$

З виразу (4.8) при відомому струмі (4.7) можна визначити індуктивність за допомогою співвідношення:

$$L = \frac{2W}{|I|^2}, (4.10)$$

Опір провідника при відомому напрузі і струмі визначається за допомогою наступного виразу:

$$R = \operatorname{Re}\left(\frac{V}{I}\right), (4.11)$$

Щоб провести розрахунок наведених вище рівнянь, використовуємо програмно-математичний пакет Comsol Multiphysics, що як і було вище відзначено, працює за принципом методу скінченних елементів. Результати розрахунків представлені на рис. 4.5-4.8.

Таким чином, знаючи розподіл магнітного поля в котушці, можна обчислити індуктивність і активний опір в залежності від частоти джерела живлення.

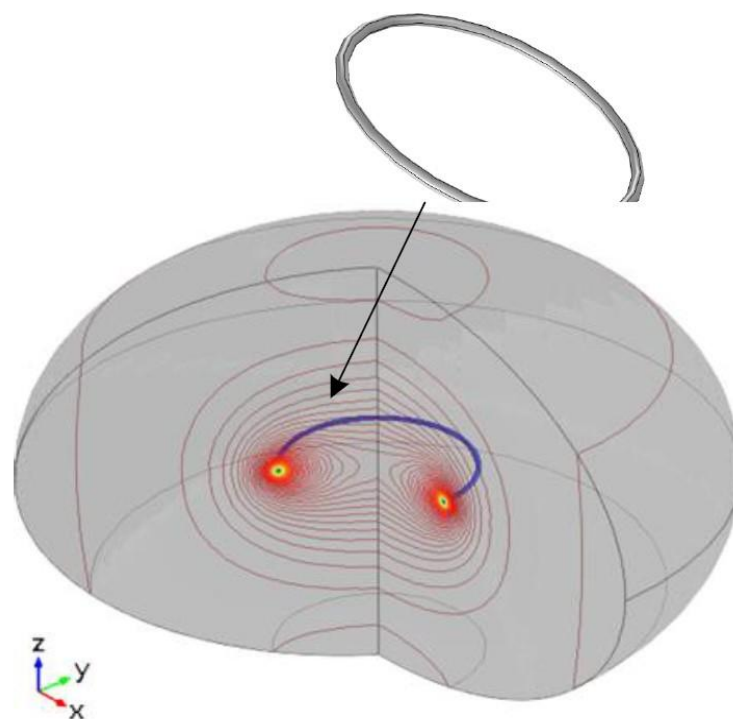


Рис. 4.5 Розподіл вектора магнітного потенціалу \mathbf{A} системи однієї котушки

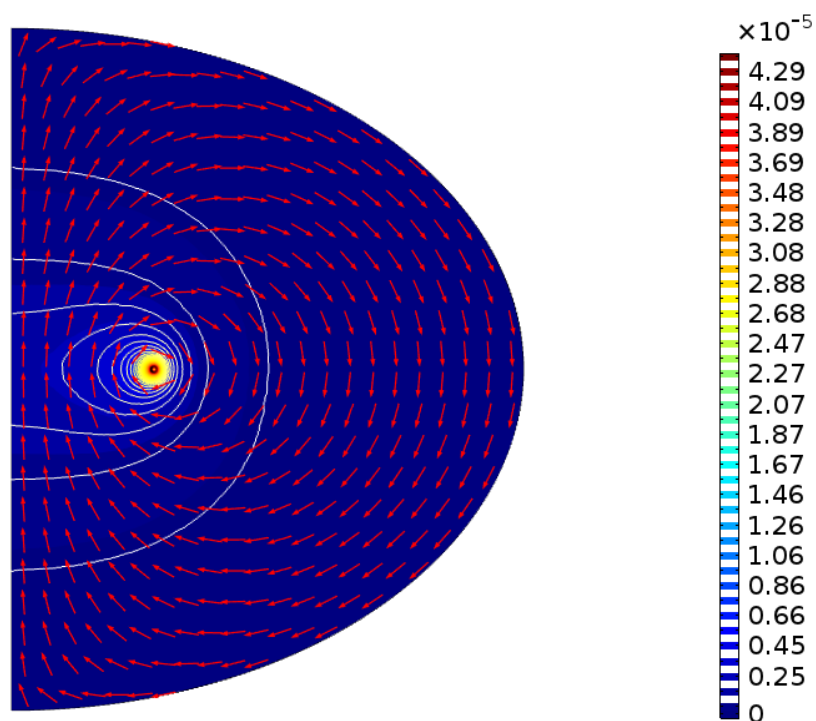


Рис. 4.6 Розподіл силових ліній магнітного потенціалу A_ϕ

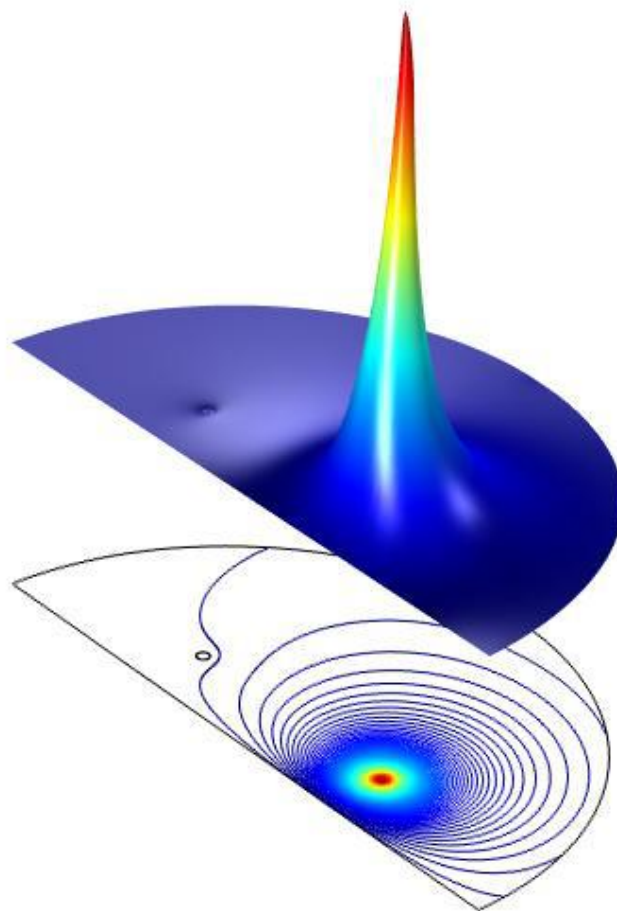


Рис. 4.7 Поле розподілу вектора магнітного потенціалу A по поверхні котушки

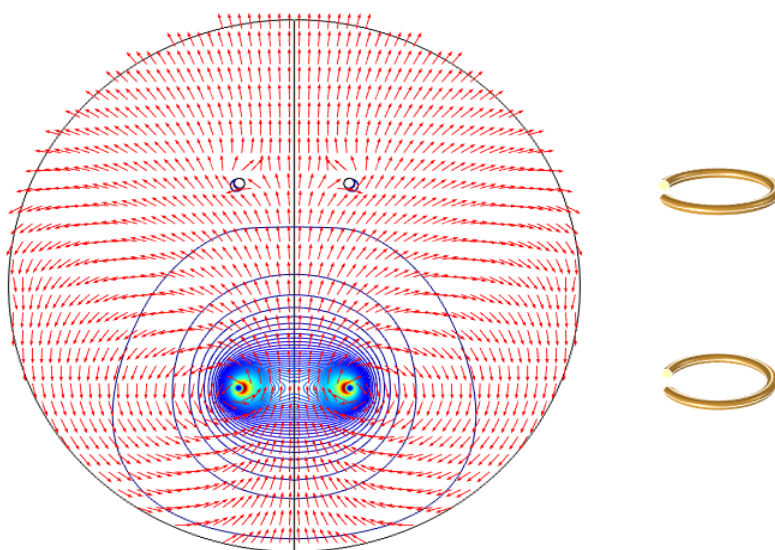


Рис. 4.8 Розподіл поля магнітного потоку у вигляді нормованих векторів, що вказують напрямки і інтенсивність поля у вигляді ізоліній

Внаслідок скін-ефекту велика частина значення струму протікає в поверхневому шарі котушки, таким чином, значна частина поперечного перерізу котушки лишається невикористаною. Результати моделювання розподілу щільності струму \mathbf{J} [А/м²] і енергії в поперечному перерізі котушки $r = 5$ см і $R = 0,25$ м наведені на рис. 4.9-4.11.

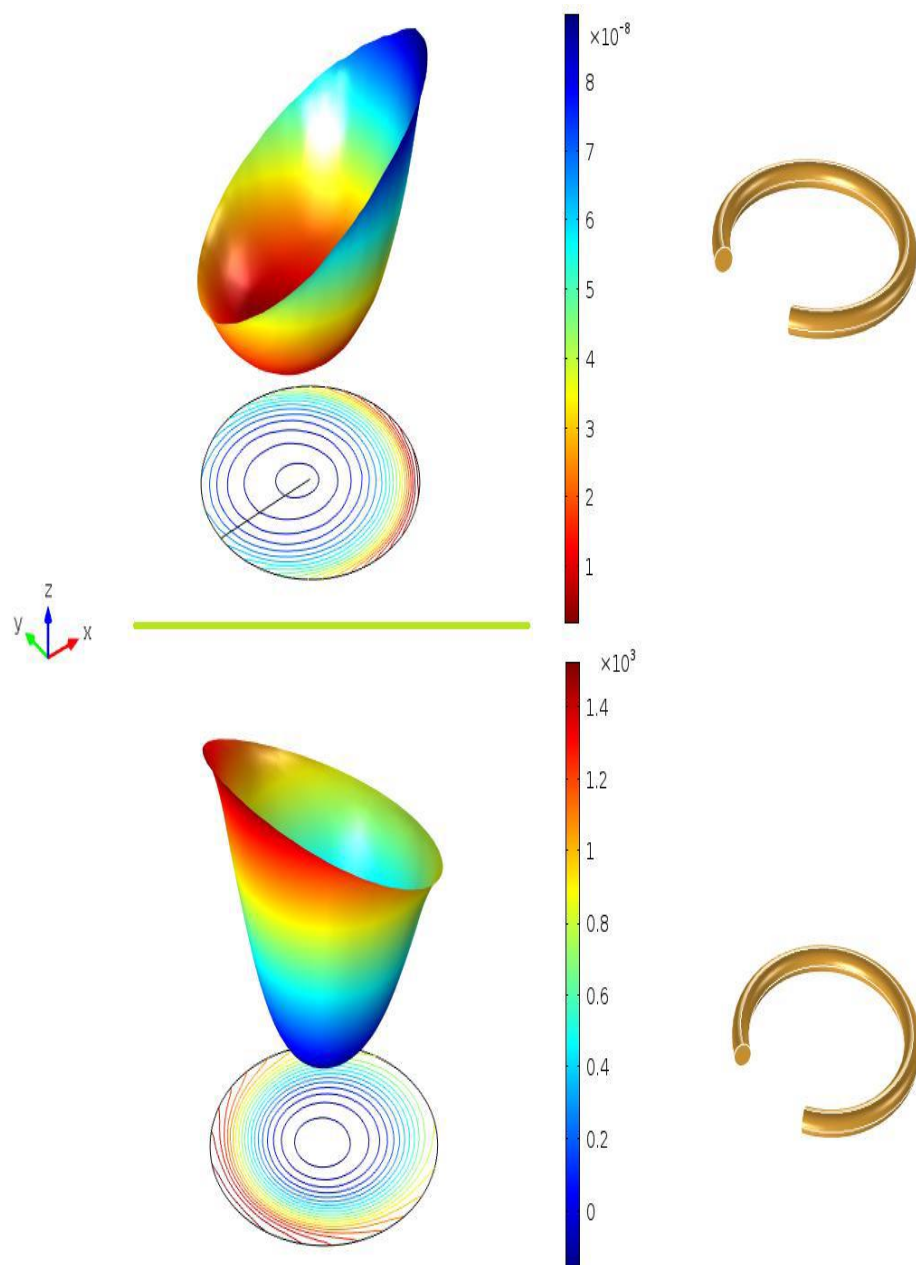


Рис. 4.9 Розподіл щільності струму і енергії в поперечному перерізі провідника при частоті $f = 100$ Гц

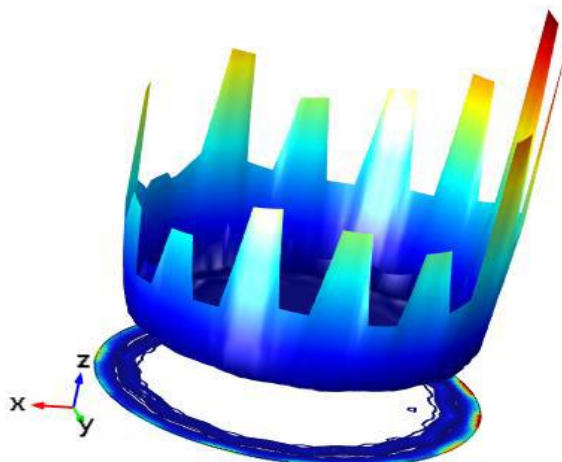


Рис. 4.10 Розподіл щільності енергії в поперечному перерізі провідника при частоті $f = 1000$ Гц

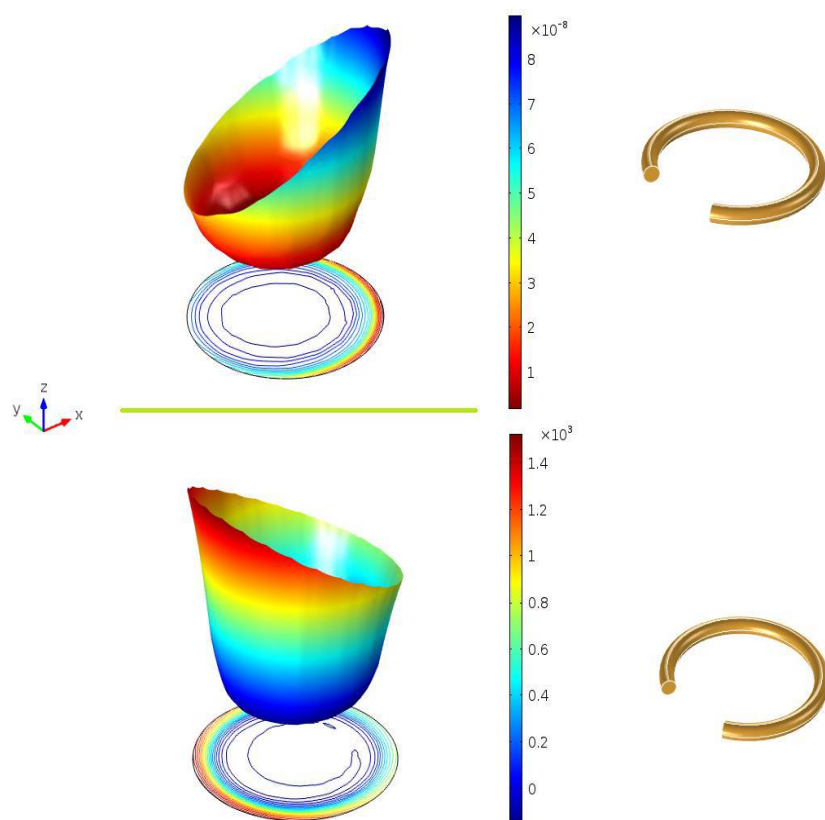


Рис. 4.11 Розподіл щільності струму і енергії в поперечному перерізі провідника при частоті $f = 500$ Гц

4.4. Розрахунок індуктивності і активного опору котушки

На підставі вищенаведених результатів моделювання магнітного поля побудуємо частотні залежності індуктивності і активного опору котушки. Результати розрахунків представлені на рис. 4.12-4.13.

Як видно на рис. 4.12 індуктивність котушки в області високих частот різко падає і встановлюється на постійній величині, тобто L залишається без змін в області високих частот. Це відбувається внаслідок насичення матеріалу досліджуваної котушки в області високих частот. Отриманий результат індуктивності в області високих частот дорівнює $L = 1,238$ мкГн.

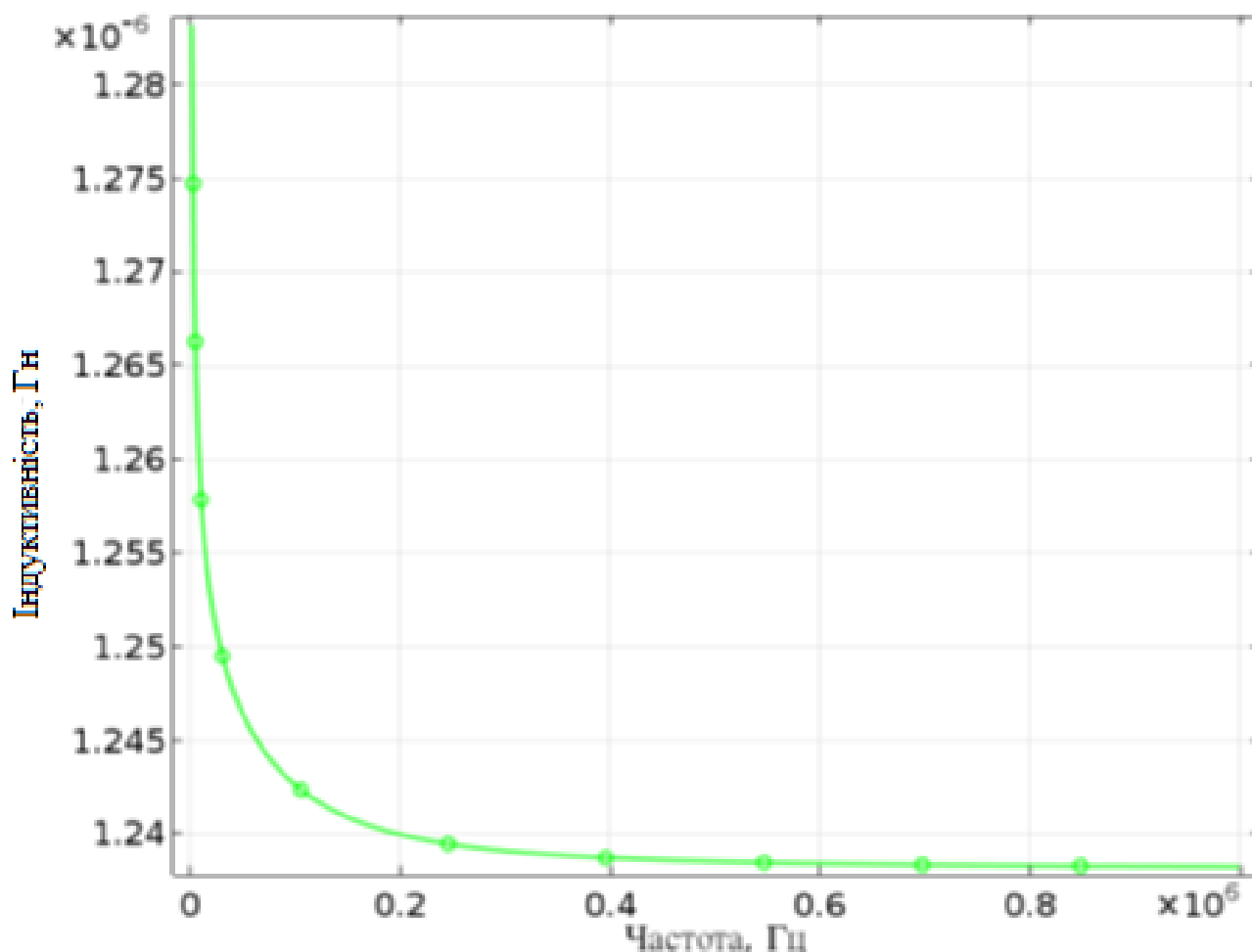


Рис. 4.12 Розрахунок індуктивності котушки в області високих частот

Для оцінки отриманих результатів проводимо розрахунок індуктивності для кругового кільця перетину.

Індуктивність кільця в області високих частот при $R \gg r$ обчислюється за формулою:

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 2 \right), \quad (4.12)$$

Тоді значення індуктивності в області високих частот одне:

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 2 \right) = 4 * \pi * 10^{-7} * 0,25 * \left(\ln \frac{8 * 0,25}{5 * 10^{-3}} - 2 \right) = 1,254 * 10^{-6} \text{ Гн}$$

Порівняємо значення індуктивності, розрахованої аналітично зі значенням отриманим з Comsol Multiphysics:

$$L_{\text{експ.}} = 1,254 \text{ мкГн.}$$

$$L_{\text{анал.}} = 1,238 \text{ мкГн.}$$

Відносна похибка в розрахунках значення індуктивності становить:

$$\frac{L_1 - L_2}{L_2} * 100\% = \frac{1,254 * 10^{-6} - 1,238 * 10^{-6}}{1,238 * 10^{-6}} * 100 = 1,27\%,$$

На підставі розрахованої індуктивності робимо висновок, що розрахунки проведені вірно з мінімальною похибкою. На рис. 4.13 представлена залежність активного опору котушки від частоти.

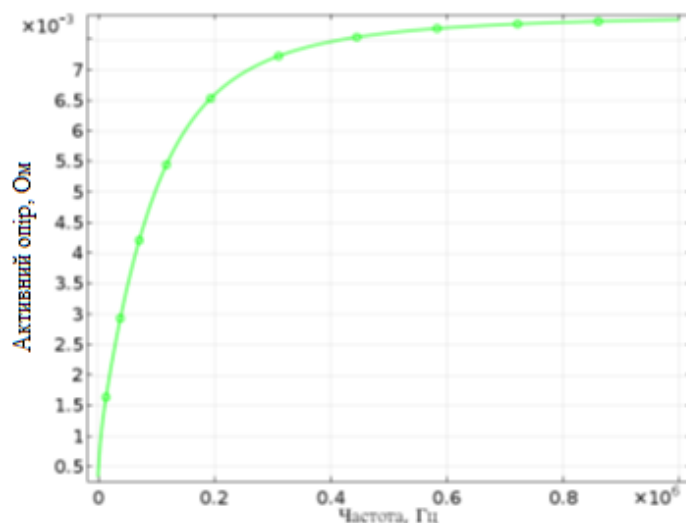


Рис. 4.13 - Розрахунок активного опору котушки в області високих частот

4.5. Розрахунок власної ємності котушки

Власна ємність провідника у формі кругового кільця розраховується відповідно до виразу:

$$C_0 = 4\pi^2 \varepsilon R * (\ln(\frac{8R}{r}))^{-1}, (4.13)$$

де, $\varepsilon = \varepsilon_0$ – діелектрична проникність повітря.

Визначимо ємність розташованої в повітрі котушки в формі кругового кільця радіусом $R = 0,25$ м і радіусом поперечного перерізу $r = 0,005$ м, використовуючи формулу (4.13):

$$C_0 = 4\pi^2 \varepsilon R * \left(\ln\left(\frac{8R}{r}\right)\right)^{-1} = 4 * 3,14^2 * 8,85 * 10^{-12} * 0,25 * \left(\ln\left(\frac{8*0,25}{0,005}\right)\right)^{-1} = 14,58 \text{ пФГ}$$

4.6. Моделювання електромагнітного поля для котушок різної конфігурації

У зв'язку з тим, що досліджується методика бездротової передачі енергії, потрібно встановити факт виникнення максимуму переданої потужності при резонансі ланцюга в приймаючій котушці, тому в завданні розглядаються дві системи котушок: одна з них складається з двох кілець, в якій на передавальне кільце подається напруга $U = 1$ В, інша система з шести кілець, в якій передавальної котушкою є три кільця (рис. 4.14).

Послідовність моделювання магнітних полів, розподіл щільності струму в перетинах провідника і обчислення параметрів котушки робимо в тій же послідовності, що і в попередньому розділі.

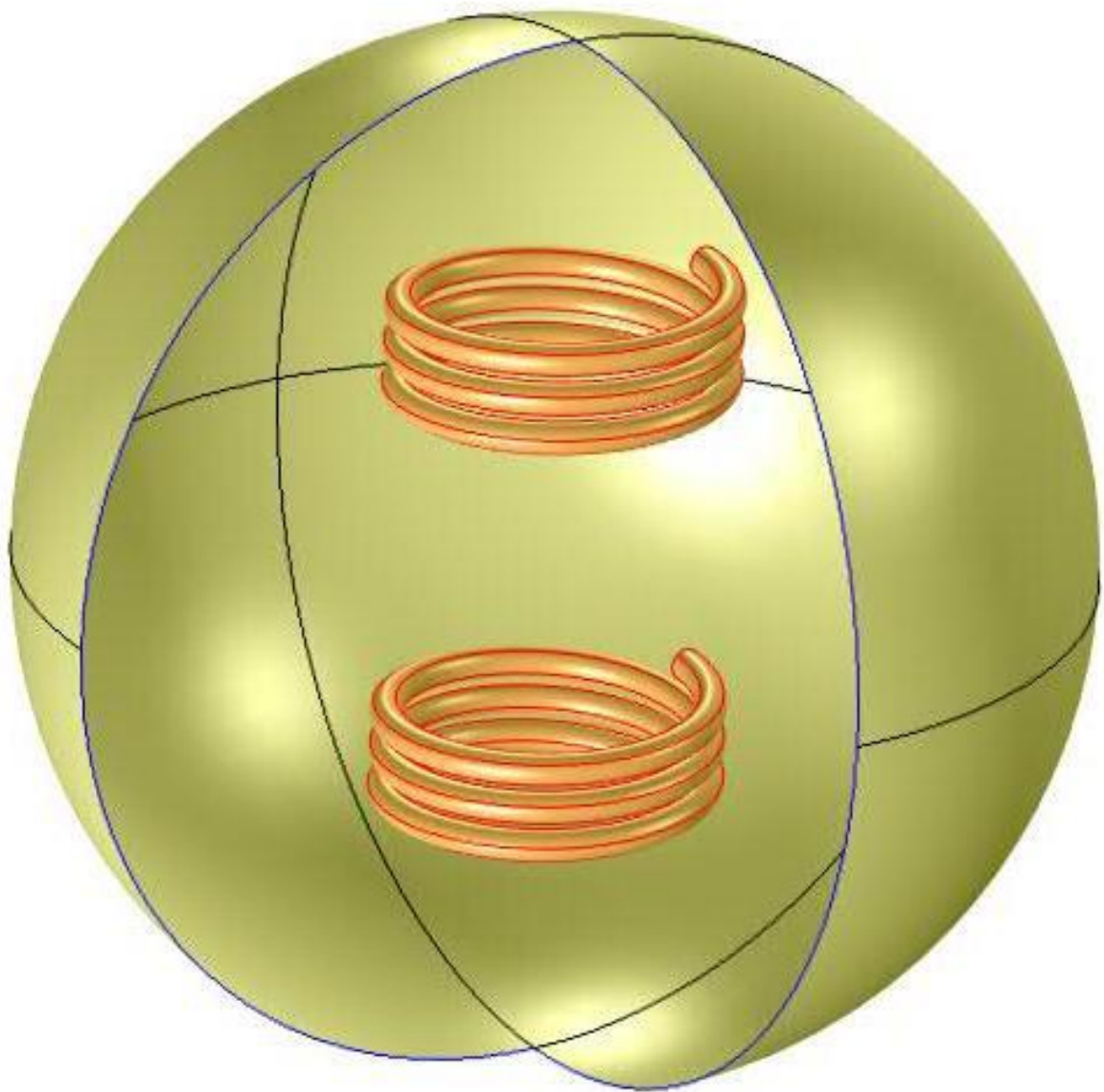


Рис. 4.14 Система двох спіралеподібних котушок

Моделювання і розрахунки проводимо в програмі Comsol Multiphysics, в основі якого лежить рівняння Гельмгольца для змінного струму

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla\mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Результати моделювання для обох випадків наведені на рис. 4.15-4.18.

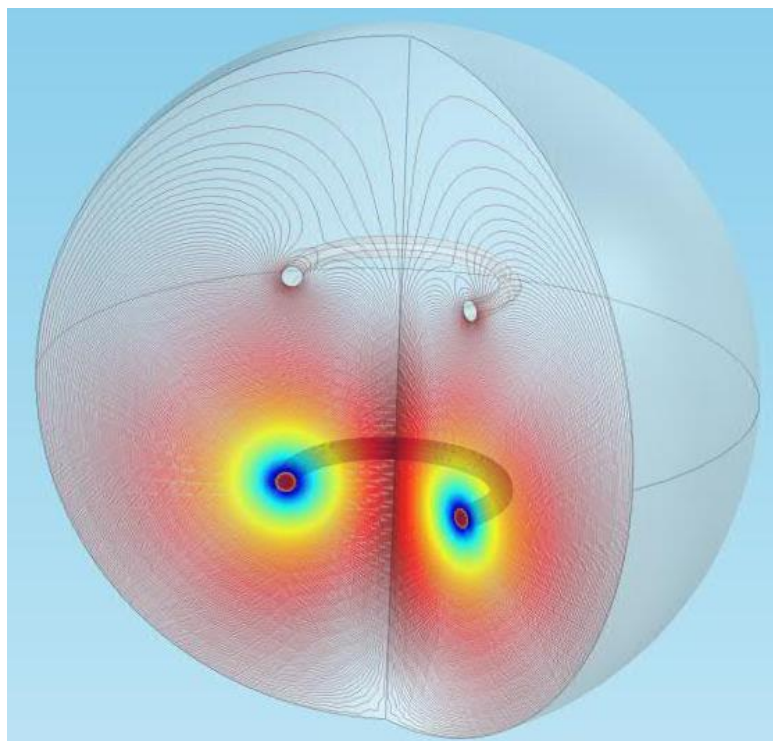


Рис. 4.15 Нормальна складова вектора напруженості E в вигляді ізоліній для системи, що складається з двох кілець

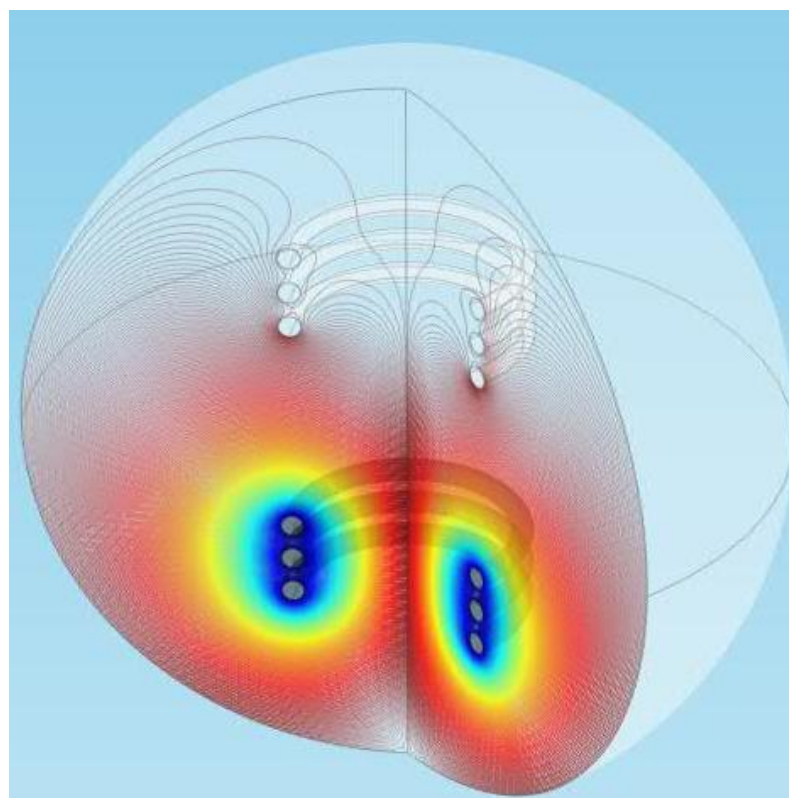


Рис. 4.16 Нормальна складова вектора напруженості E в вигляді ізоліній для системи, що складається з шести кілець

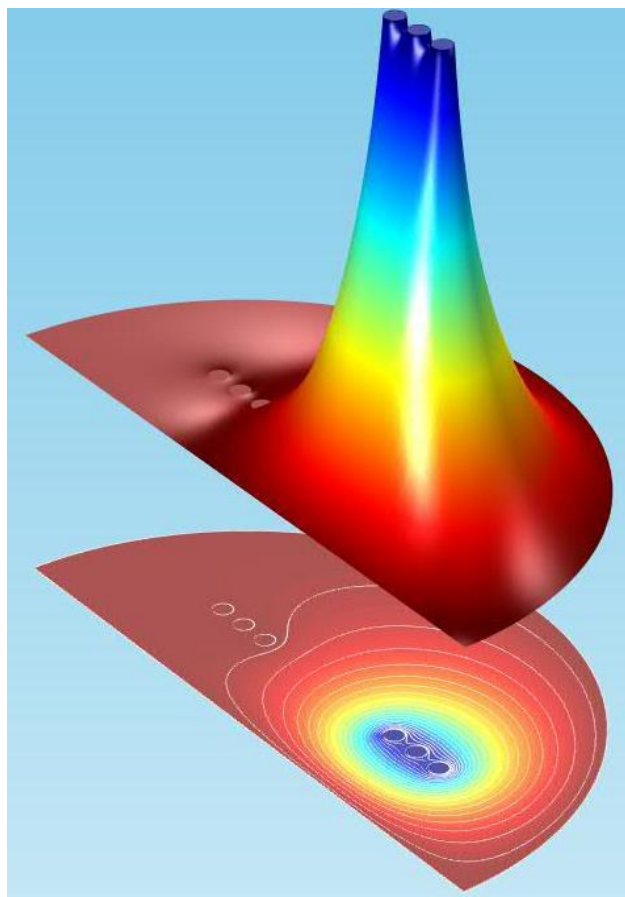


Рис. 4.17 Поле розподілу вектора електричної напруженості E по поверхні котушки

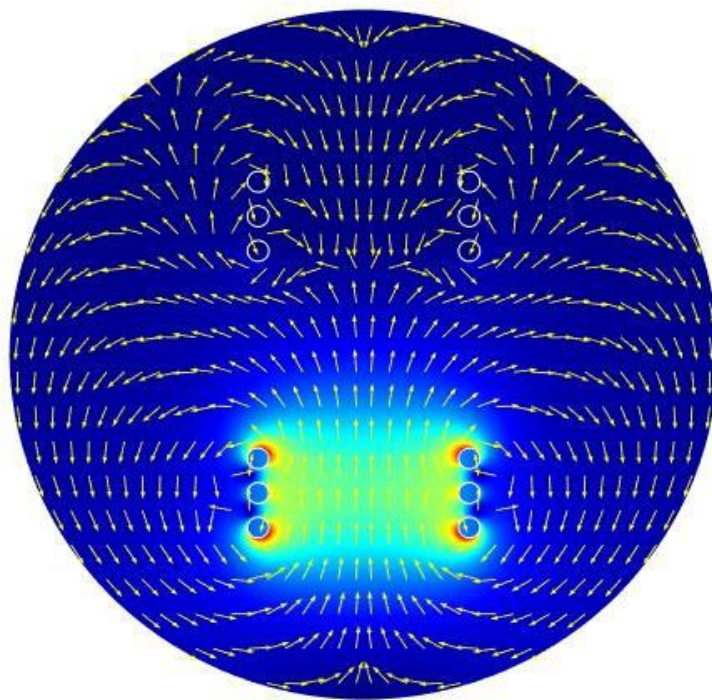


Рис. 4.18 - Поле розподілу вектора магнітної напруженості H по поверхні котушки

4.7. Розрахунок потужності в приймальній котушці спіралевидної форми

На підставі отриманих результатів (рис. 4.15-4.18) потрібно провести обчислення енергії W , що надходить з передавальної котушки на приймальну для спіралеподібної системи котушок. Обчислення проводимо в програмі Comsol Multiphysics і зводимо в табл. 4.1. У табл. представлений діапазон частот від 100 кГц до 3 МГц з кроком 100 кГц з метою зменшення обсягу записів табличних даних.

Табл. 4.1 - Результати розрахунку енергії в приймальній котушці в залежності від частоти

f , Гц	W , Дж	f , Гц	W , Дж	f , Гц	W , Дж
1.0001E5	1.6742E-6	1.1000E6	1.3893E-8	2.1000E6	3.8120E-9
2.0001E5	4.1966E-7	1.2000E6	1.1674E-8	2.2000E6	3.4734E-9
3.0001E5	1.8665E-7	1.3000E6	9.9471E-9	2.3000E6	3.1779E-9
4.0001E5	1.0502E-7	1.4000E6	8.5769E-9	2.4000E6	2.9186E-9
5.0001E5	6.7226E-8	1.5000E6	7.4715E-9	2.5000E6	2.6898E-9
6.0001E5	4.6688E-8	1.6000E6	6.5667E-9	2.6000E6	2.4869E-9
7.0001E5	3.4304E-8	1.7000E6	5.8169E-9	2.7000E6	2.3061E-9
8.0001E5	2.6265E-8	1.8000E6	5.1886E-9	2.8000E6	2.1443E-9
9.0001E5	2.0753E-8	1.9000E6	4.6568E-9	2.9000E6	1.9990E-9
1.0000E6	1.6810E-8	2.0000E6	4.2028E-9	3.0000E6	1.8679E-9

Так як потужність це зміна енергії в часі, то вираз потужності, що надходить на приймальну котушку, опишеться наступним виразом:

$$P(\omega) = \frac{dW(\omega)}{dt} = \frac{dW}{d\omega} \frac{d\omega}{dt} = \omega^2 \frac{dW}{d\omega}, (4.1)$$

На підставі (4.1) побудуємо графік залежності енергії та потужності від частоти (рис. 4.19-4.20).

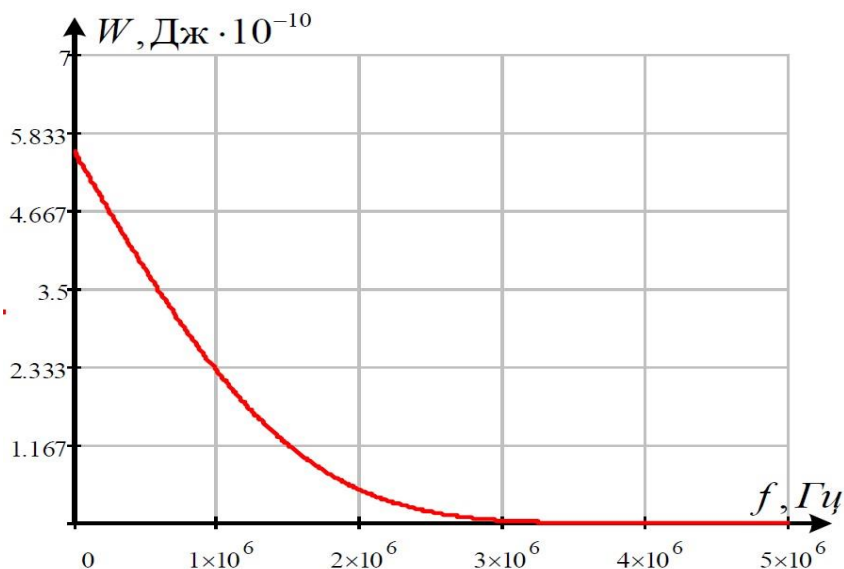


Рис. 4.19 Графік залежності енергії, що надходить в приймальну котушку від частоти

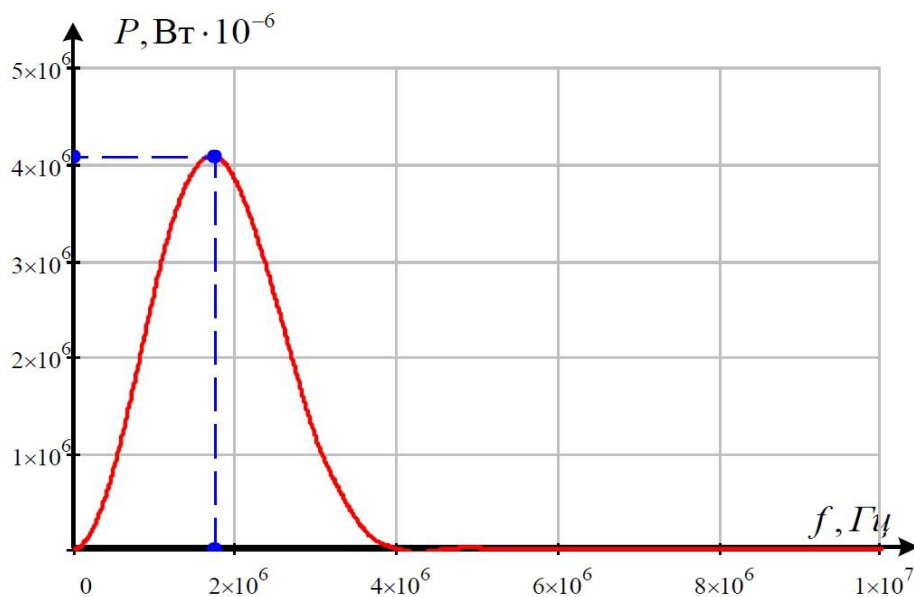


Рис. 4.20 Графік залежності потужності в приймальнікотушці від частоти

За графіком (рис. 4.20) залежності потужності від частоти, що надходить в приймальну котушку, визначимо на яке значення частоти припадає пік потужності, тобто резонансну частоту і порівняємо її з раніше отриманою. Результат розрахунку наведемо у вигляді табл. 4.2.

Табл. 4.2 - Результати розрахунку максимуму потужності

$P_{\text{макс}}, \text{Вт}$	$f, \text{МГц}$
4,077	1,74

Висновки

В даному розділі проведено моделювання магнітного поля в двох котушках та передача енергії між ними в програмному пакеті Comsol Multiphysics.

Знаючи розподіл вектора магнітного потенціалу \mathbf{A} , за рівнянням Гельмгольца складено алгоритм для обчислення індуктивності і активного опору котушок будь-якої конфігурації. З метою отримання більш точних розрахунків було взято до роботи різні геометрії котушок, що складаються з двох та шести кілець. В процесі проектування котушок більш складної конфігурації процес розрахунку параметрів котушки сильно ускладнюється, тому що вимагає вирішення складних рівнянь.

При розрахунку параметрів котушок враховувався вплив скін-ефекту (рис. 4.19-4.20), де показано, що в області НЧ щільність струму в поперечному перерізі зосереджена не тільки на поверхні котушки, а й частково в центрі котушки, в той час як в області високих частот тільки на поверхні котушки, що обумовлює такі умови, при яких більша частина поперечного перерізу котушки лишається невикористаною.

ВИСНОВКИ

В рамках даної магістерської дисертації, розглянуто існуючі способи бездротової передачі енергії. Обрано прийнятний варіант передачі енергії за допомогою методу електромагнітної індукції, для системи бездротової зарядки електромобіля. Даний спосіб більш економічний та практичний у плані дослідження і проектування, і так само більш гнучкий для застосування в повсякденному житті.

У другому розділі детально описано принцип дії бездротової передачі електроенергії на основі явища електромагнітної індукції, що обґрунтовано математичними розрахунками.

В третьому розділі показано принцип дії імпульсної бездротової платформи для зарядки автомобільних акумуляторів за стандартом WPC. Наведено їх схемотехнічні рішення. Так само відображено використання платформи за стандартом WPC в якості безконтактної передачі енергії при зарядці електромобіля. Показані вже функціонуючі пілотні проекти використання даної платформи безпосередньо на дорогах загального користування.

Для моделювання в четвертому розділі бездротової передачі енергії використовувався програмний пакет Comsol Multiphysics, заснований на методі кінцевих елементів, з метою виявлення основних параметрів передавальної і приймальної котушки в залежності від діапазону частот. Також, в четвертому розділі роботи проведено дослідження з передачі енергії з передавальної котушки на приймальну котушку, в результаті чого отримано графік, на якому явно простежується максимум переданої потужності в приймальну котушку при резонансній частоті. Таким чином, створено алгоритм, що дозволяє моделювати електромагнітні поля і проводити складні обчислення параметрів котушок при обліку їх складної конфігурації і взаємної відстані між ними.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Запасный А.И. Основы теории цепей: Учебное пособие. – М.: РИОР, – 2006. – 336 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.: ил.
3. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.
4. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. Science, 2007, v. 317 (5834), pp. 83-86.
5. Huber L., Gang L., Jovanović M. Design-Oriented Analysis and Performance Evaluation of Buck PFC Front End. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 1, January 2010.
6. Nolle E., Neuberger N., Banschbach R., Kovalenko I. Kontaktlose Energieübertragung für eine Solartankstelle, Induktivitäten räumlich ausgedehnter Spiralspulen. HE Spektrum, Nr. 39, 2014.
7. Пуказов Я.Г. Передача электрической энергии в электромобиль (Yakobi technical solution) [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <http://ukazov.ru/yakobi-technical-solution/>
8. Беспроводная зарядка электромобилей во время движения уже в ближайшей перспективе [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://geektimes.ru/company/icover/blog/263180/>
9. Беспроводная зарядка для электромобиля [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <http://ecoconceptcars.ru/2011/03besprovodnaja-zarjadkajelektromobilja.html>

10. Повышение эффективности бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <http://jmtf.febras.ru/journal/1-21-2016/24-30.pdf>

11. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <http://www.russianelectronics.ru>

12. Karalis A., Joannopoulos J.D., Soljacic M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of physics*, 2007, V.323, Is. 1, pp. 34-48.

13. Away I., Zhang Y. Coupling coefficient of resonators – an intuitive way of its understanding. *Electronics and Communication in Japan*, p. 2, V. 90, No. 9, 2007.

14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 8: Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992. – 664 с.

15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 2: Теория поля. – М.: Наука, 2001. – 533 с.

16. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Физматлит, 2003. – 616 с.

17. Ving R. Wireless energy transfer by resonant inductive coupling. Master of science thesis. Sweden, Goteborg, – 2015, p.83.

18. Сайт компанії розробника пакета Comsol Multiphysics. [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://www.comsol.ru/>

19. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 393 с.

20. Введение в Comsol Multiphysics 5.2. [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://www.comsol.ru/>

21. Технология беспроводной зарядки [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://www.comsol.ru/>

22. Беспроводная зарядка: идеология и расчет безопасности, схемотехника, изготовление своими руками [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://vopros-remont.ru/elektrika/besprovodnaya-zaryadka/>